

Titre: Analyse expérimentale de la performance thermoélectrique des
Title: modules générateurs

Auteur: Aroua Belhadj
Author:

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Belhadj, A. (2015). Analyse expérimentale de la performance thermoélectrique
Citation: des modules générateurs [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1708/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1708/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Sylvain Turenne, & Rémo Masut
Advisors:

Programme: Génie physique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE EXPÉRIMENTALE DE LA PERFORMANCE THERMOÉLECTRIQUE DES
MODULES GÉNÉRATEURS

AROUA BELHADJ

DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE PHYSIQUE)

AVRIL 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ANALYSE EXPÉRIMENTALE DE LA PERFORMANCE THERMOÉLECTRIQUE DES
MODULES GÉNÉRATEURS

présenté par : BELHADJ Aroua

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Mme SANTATO Clara, Doctorat, présidente

M. MASUT Remo A. Ph. D., membre et directeur de recherche

M. TURENNE Sylvain, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. SAVADOGO Oumarou, D. d'état, membre

DÉDICACE

À mon mari et à mes parents

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à mon directeur de recherche M. Remo Masut qui m'a donné la chance de pouvoir réaliser ce projet. Qu'il soit vivement remercié pour l'encadrement qu'il m'a offert, pour sa disponibilité et surtout pour ses conseils utiles.

Je voudrais exprimer ma gratitude à M. Dimitri Vasilevskiy qui m'a formé au travail en laboratoire et qui m'a encadré au long de ce projet. Ses connaissances en thermoélectricité m'ont permis de progresser dans ma recherche.

Mes remerciements s'adressent également à mon co-directeur de recherche M. Sylvain Turenne, pour son soutien et ses précieuses interventions et conseils.

Je remercie aussi M. Jean Marc Simard pour sa précieuse coopération et pour son aide à chaque fois que je l'ai sollicité.

Je remercie les membres du jury Mme Clara Santato et M. Oumarou Savadogo d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je salue mes collègues et tous les membres du groupe de thermoélectricité de l'École Polytechnique de Montréal, je remercie spécialement Lurdez pour les travaux de simulation et Zouhour pour son aide au laboratoire.

Enfin, je remercie le FRQNT et le CRSNG pour le financement de ma recherche.

RÉSUMÉ

Les générateurs thermoélectriques (GTE) sont des dispositifs capables de convertir un flux de chaleur en puissance électrique, qui peuvent être employés dans diverses applications. Pour cette raison, il est important d'évaluer leurs performances pour permettre leur utilisation dans des applications industrielles.

Ce projet de maîtrise a pour but de faire une caractérisation thermoélectrique des modules générateurs qu'on nommera MTE, en ayant recours à une approche expérimentale basée sur la production d'une différence de température aux surfaces du module. Nous présentons alors un modèle de système de conditionnement et de mesure capable de déterminer les principaux paramètres d'un MTE, pour une large différence de température, sur des modules de dimensions $40 \times 40 \text{ mm}^2$ et ayant des longueurs de pattes variables ($l = 1.5 \text{ mm}$ et $l = 2 \text{ mm}$). Les paramètres mesurés sont la tension en circuit ouvert V_{OC} , le courant en court circuit I_{CC} , la puissance maximale générée P_{MAX} , le flux de chaleur Q_H ainsi que l'efficacité de conversion η . À partir de ces grandeurs, il est possible de remonter à la valeur de la résistance électrique interne R du module.

Le système de conditionnement et de mesure est muni d'un bloc chaud composé de cartouches chauffantes et d'un bloc froid refroidi à l'eau, entre lesquels le module est comprimé. Les températures des deux blocs sont mesurées par des thermocouples placés aux surfaces du MTE. Les procédures de chauffage et de refroidissement sont sous le contrôle d'un régulateur de température de type PID. La pression appliquée sur le module varie de 0 MPa à 1.275 MPa. La différence de température imposée aux surfaces du générateur TE permet de générer une puissance électrique, qui dépend de la pression appliquée. Le MTE à caractériser est connecté à un régulateur électronique de charge (résistance de charge). Les données provenant des thermocouples (température), du régulateur électronique de charge (courant-tension) ainsi que de la cellule de charge (pression) sont enregistrées dans l'ordinateur et les mesures sont assurées par un logiciel incorporé au système de mesure.

La pression mécanique appliquée sur le MTE a permis d'augmenter la puissance électrique générée jusqu'à atteindre un plateau après 0.45 MPa. Des tests effectués sur des modules appartenant à un même lot (mêmes dimensions, mêmes longueurs des pattes et mêmes matériaux TE) ont démontré que ces MTE ne présentent pas la même performance TE. Des variations d'au moins 1% ont été observées. Ceci est attribué aux variabilités introduites dans les

procédés de fabrication. Par ailleurs, la longueur des pattes du module influe sur sa performance TE. Plus la différence de température augmente, plus l'efficacité de conversion est élevée. Une simulation numérique à l'aide d'une approche d'éléments finis a été faite sur un module dans les mêmes conditions de mesure expérimentales et a révélé que les valeurs expérimentales et théoriques sont assez proches, ce qui nous a permis de valider ce système de mesure.

Ce travail présente aussi les résultats d'une étude préliminaire d'un autre système de mesure original permettant de mesurer un module individuellement ou encore un assemblage de plusieurs MTE. Son principe de mesure étant le même que pour l'autre système, il diffère par son architecture et ses dimensions : il est constitué de deux blocs froids, entre lesquels est placé le bloc chaud. Il n'est pas muni d'une cellule de charge pour évaluer la pression instantanément.

Ce système a permis d'étudier un assemblage électriquement en série ou en parallèle des MTE à différentes conditions de mesure, à savoir la différence de température et la pression mécanique appliquée sur les modules.

Il a été démontré qu'il existe une non-uniformité de la température le long des blocs de ce système de mesure qui affecte les valeurs de V_{OC} et I_{CC} . Par ailleurs, l'augmentation du nombre de modules n connectés électriquement en série augmente la puissance générée. D'autre part, la performance des modules en série ne peut pas être prédite par l'addition des performances individuelles de chaque MTE en raison de l'effet Peltier qui influe sur le flux de chaleur et de la non-uniformité de la température le long du bloc.

Finalement, une comparaison des performances d'un seul MTE obtenues par les deux systèmes de conditionnement et de mesure a été menée pour déterminer la valeur de la résistance électrique interne. Une différence de 14% a été notée entre les deux valeurs. Il a été confirmé que le système d'assemblage des MTE (le 2^{ème} système présenté dans ce mémoire) présente certaines limitations comme la non-uniformité de la température le long d'un bloc de chauffage et de refroidissement, le manque de précision dans la détermination de la pression de serrage et l'impossibilité d'évaluer le flux de chaleur. Ces limitations influent sur les paramètres mesurés.

Ces résultats expérimentaux ont permis de confirmer la reproductibilité du système d'évaluation de la performance thermoélectrique des modules TE en tant que générateurs d'électricité et d'envisager des voies pour l'amélioration de la conception de ces systèmes de mesure.

ABSTRACT

Thermoelectric generators (TEG) are devices used to recover heat for power generation, which may be employed in various applications. Thus, it is important to experimentally evaluate their performance to ensure an adequate design and to use them in industrial applications.

This project aims to characterize thermoelectric generator modules, using an experimental approach based on the production of a temperature difference on the module surfaces. We present a test system capable of determining the main parameters of a TEG, over a large temperature difference, for a $40 \times 40 \text{ mm}^2$ module with different legs length ($l = 1.5 \text{ mm}$ et $l = 2 \text{ mm}$). The measured parameters are the open circuit voltage V_{OC} , the short circuit current I_{SC} , the maximum generated power P_{MAX} , the heat flux Q_H , and the conversion efficiency η . From these parameters, it is possible to retrieve the values of the electrical internal resistance R of the module.

In the proposed measurement system, the TE module is compressed between the hot and the cold blocks of the system. The hot block uses three cartridge heaters and the cold block is cooled by water circulation. The temperatures of the two sides are measured by thermocouples placed on the surfaces of the module. The heating and cooling procedures are under the control of PID temperature controllers. The pressure applied on the module can be varied from 0 MPa to 1.275 MPa. The temperature difference imposed on the surfaces of the TEM allows generating electric power, which depends on the pressure applied. The TEM is connected to an electronic load «B&K precision 8500». Data collection from thermocouples (temperature), electronic load (current-voltage) and load cell (pressure) are recorded and managed by a software incorporated to the measurement system.

Our measurements corroborate that as the mechanical pressure on the module increases, the generated power also increases until reaching a plateau at about 0.45 MPa. Different tests have demonstrated that TEMs belonging to the same batch (same dimensions, same TE materials, same legs length) don't have the same thermoelectric performance, a variability of at least 1% is observed, which is attributed to the variability introduced in the manufacturing process. Furthermore, TEM legs length affects its thermoelectric performance. The conversion efficiency is higher when the temperature difference increases. Finally, numerical simulations of one module using a finite element approach, under the same experimental conditions, revealed that the experimental and theoretical values are closed.

This project presents results of a preliminary evaluation of another original measurement

system capable of measuring one module individually or the assembly of several electrically connected modules; the principle of measuring is the same as for the other system with differences in the actual implementation. This system has another architecture: it is composed of one hot block placed between two cold blocks and it has not been provided with a load cell to measure pressure instantaneously.

This system allowed studying an assembly of TEM electrically in series or in parallel under different conditions, namely the temperature difference and the mechanical pressure applied to the modules.

It has been demonstrated that there is a non-uniformity of temperature along both blocks of the assembly system affecting V_{OC} and I_{CC} values. Moreover, increasing the number of modules n connected electrically in series increases the electrical power generated. However, the performance of the assembly of modules in series cannot be predicted by adding the individual performance of each TEM due to Peltier effect, which influences the heat flux and the non-uniformity of the temperature along the blocks.

Finally, a comparison of TEM performance of a single module, obtained by the two measurement systems was conducted to evaluate the internal electrical resistance. A difference of 14% was noted between the two values. It was confirmed that the assembly measurement system (the 2nd system presented in this work) has certain limitations such as the non-uniformity of the temperature along a block, the lack of precision in the determination of the clamping pressure and the inability to assess the heat flow. These limitations affect the measured parameters.

These experimental results allowed us to confirm the reproducibility of the thermoelectric performance evaluation system of TEM as power generators and will allow improving the design of measurement systems.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES ANNEXES.....	XXII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 PHÉNOMÈNES ET CONCEPTS THERMOÉLECTRIQUES	4
2.1 Phénomènes thermoélectriques	4
2.1.1 L'effet Seebeck	4
2.1.2 L'effet Peltier	5
2.1.3 L'effet Thomson.....	6
2.2 Survol sur les matériaux thermoélectriques	7
2.2.1 Propriétés des matériaux TE utilisés dans ce projet.....	10
2.3 Configuration des modules thermoélectriques.....	11
2.3.1 Modèle «idéal»	13
2.3.2 Modèle «réaliste»	15
2.4 Les applications de la thermoélectricité	18
CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE.....	21
3.1 Caractérisation d'un module thermoélectrique	21
3.1.1 Basse différence de température	21

3.1.2	Haute différence de température	29
3.2	Caractérisation de plusieurs modules thermoélectriques	32
3.2.1	Caractérisation simultanée	32
3.2.2	Caractérisation d'un assemblage de modules.....	33
CHAPITRE 4 SYSTÈMES DE MESURE DES MODULES TE.....		37
4.1	Système de conditionnement et de mesure d'un seul module thermoélectrique.....	37
4.1.1	Description	37
4.1.2	Déroulement d'un test de mesure.....	48
4.2	Système de conditionnement et de mesure d'un assemblage de modules TE	50
4.2.1	Description	50
4.2.2	Déroulement d'un test de mesure.....	53
4.3	Modules thermoélectriques	55
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS		58
5.1	Caractérisation d'un module thermoélectrique	58
5.1.2	Influence de la pression mécanique sur la puissance générée.....	69
5.1.3	Comparaison entre des modules TE à différentes longueurs de pattes	71
5.1.4	Comparaison avec les données de la fiche technique du fabricant	82
5.1.5	Validation du système de mesure.....	85
5.2	Caractérisation d'un assemblage de modules TE.....	87
5.2.1	Évaluation des paramètres TE d'un assemblage de modules.....	88
5.2.2	Influence de la position du module TE sur sa performance	90
5.2.3	Étude de la pression mécanique	92
5.2.4	Performance de l'assemblage des modules TE en série.....	95
5.2.5	Performance de l'assemblage des modules TE en parallèle	103

5.3	Comparaison entre les deux systèmes de mesure étudiés	105
5.3.1	Limites du système d'assemblage des MTE	108
CHAPITRE 6	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	109
BIBLIOGRAPHIE	113
ANNEXES	133

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1: Valeurs typiques des paramètres thermoélectriques pour les isolants, les semi-conducteurs et les métaux [10].....	8
Tableau 2-2 : Exemples des propriétés de transport des alliages $(\text{Bi}, \text{Sb})_2(\text{Te}, \text{Se})_3$ de type p et de type n à température ambiante	11
Tableau 4-1: Caractéristiques du thermocouple.....	42
Tableau 4-2: Spécifications du modèle «B&K <i>precision</i> 8500» du régulateur électronique de charge	46
Tableau 4-3: Noms et dimensions des modules TE caractérisés dans le système de conditionnement et de mesure d'un seul MTE.....	56
Tableau 4-4: Noms et dimensions des modules TE caractérisés dans le système d'assemblage des MTE	57
Tableau 5-1: Calcul des incertitudes de mesures pour le module MTE-1.5-1 à une différence de température $T_C=50^\circ\text{C}$, $T_H=150^\circ\text{C}$	67
Tableau 5-2: Paramètres TE obtenus pour le module MTE-1.5-1 pour une différence de température $T_C=50^\circ\text{C}$, $T_H=150^\circ\text{C}$	68
Tableau 5-3: Coefficient de Seebeck du MTE-1.5-1 à deux différences de température	68
Tableau 5-4 : Rapport des puissances entre deux différences de température.....	79
Tableau 5-5: Comparaison entre les données du fabricant et les valeurs obtenues au laboratoire de thermoélectricité de l'ÉPM pour les trois modules du «lot 1»	83
Tableau 5-6: Comparaison des résultats expérimentaux de la moyenne des modules de MTE-2-1 jusqu'à MTE-2-13 avec le module MTE-2-simulé, à $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$	86
Tableau 5-7: Valeurs de V_{OC} pour le module MTE-1.5-1A mesuré à deux différentes positions dans le système d'assemblage des modules.....	91
Tableau 5-8: Calcul de la pression appliquée sur les MTE pour chaque valeur de la force F	93

Tableau 5-9: Valeurs de I_{CC} pour les différents assemblages	97
Tableau 5-10: Mesures individuelles de V_{OC} pour les modules du «lot 3»	101
Tableau 5-11: Comparaison des valeurs de V_{OC} et I_{CC} du module MTE-1.5-1 obtenues pour les deux systèmes de mesure	105

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1: Effet Seebeck [2]	4
Figure 2-2: Effet Peltier [4]	5
Figure 2-3: Figures de mérite ZT pour différents matériaux thermoélectriques [12].....	9
Figure 2-4 : Évolution de la figure de mérite maximale ZT [13]	10
Figure 2-5 : a) Module thermoélectrique, b) Thermocouple [15]	12
Figure 2-6 : Schéma du modèle «idéal» d'un MTE	13
Figure 2-7 : Modèle «réaliste» d'un MTE : 1-Plaque de céramique (côté chaud), 2- Couche de cuivre, 3- Plaque de céramique (côté froid)	16
Figure 2-8 : Biolite Campstove [22]	19
Figure 2-9 : Dispositif Biolite [23].....	20
Figure 3-1: Schéma montrant la différence de température imposée sur un module TE	21
Figure 3-2: Dispositif de mesure utilisé par l'équipe de Faraji, capable de mesurer un seul MTE à la fois [25]	22
Figure 3-3: Comparaison entre la puissance et la tension mesurée d'un MTE présentée par l'équipe de Faraji avec les données de la fiche technique [25]	24
Figure 3-4: Système de caractérisation d'un seul MTE utilisé par l'équipe de Sandoz-Rosado [21]	25
Figure 3-5: Diagramme schématique du dispositif de mesure d'un MTE utilisé par Han et son équipe [27].....	28
Figure 3-6: Système de mesure d'un MTE proposé par Takazawa [28].....	30
Figure 3-7: Système de mesure d'un MTE présenté par A&H [29]: 1-protection de l'appareil chauffant; 2-isolation thermique; 3-bloc chaud; 4-compteur de chaleur; 5-serrures thermiques; 6-écran de protection; 7-dissipateur de chaleur; E-signal du compteur de chaleur	31

Figure 3-8: Dispositif de mesure de quatre MTE en série, proposé par Chen et son équipe [31] .	34
Figure 4-1: Équipement de mesure des modules TE conçu à l'ÉPM : (a) appareil régulateur électronique de charge «B&K <i>precision</i> 8500», (b) système de conditionnement et de mesure, (c) contrôleur de température.....	39
Figure 4-2: Schéma du système de conditionnement et mesure d'un seul MTE conçu à l'ÉPM : 1- Manivelle de contrôle de charge mécanique, 2- Bloc chaud, 3- Module TE, 4- Bloc froid, 5- Cellule de charge	40
Figure 4-3: Emplacement des thermocouples dans le système de conditionnement et de mesure des MTE (T_{H1} , T_{H2} et T_{H3} pour les températures du bloc chaud, T_{CI} pour la température du bloc froid).....	41
Figure 4-4: Contrôleurs de température de l'équipement de mesure	43
Figure 4-5: Schéma du circuit thermique reliant les TC aux contrôleurs PID et à l'ordinateur	43
Figure 4-6: Schéma du circuit électrique équivalent formé par le MTE et le régulateur électronique de charge lors des mesures	46
Figure 4-7: Schéma explicatif des connexions dans l'équipement de mesure des MTE	47
Figure 4-8: Capture d'écran du logiciel de mesure «Efficacité 2009»	48
Figure 4-9: Système de conditionnement et de mesure de plusieurs MTE conçu à l'ÉPM : 1- rondelles de pression, 2- tuyaux de circulation de l'eau de refroidissement, 3- bloc froid supérieur, 4- Modules TE, 5- bloc froid inférieur, 6- bloc chaud	51
Figure 4-10 : Photo du système d'assemblage des MTE conçu à l'ÉPM	51
Figure 4-11: Vue schématique de l'arrière du système d'assemblage des MTE et positions des thermocouples	53
Figure 4-12: Schéma du circuit électrique reliant deux MTE en série (chacun représenté par une tension et une résistance interne) avec le régulateur électronique de charge.....	54
Figure 4-13: Schéma d'un MTE.....	56
Figure 5-1: Test de mesure effectué sur le module MTE-2-1 pour $\Delta t=1s$, $\Delta T=160^{\circ}C$ et $P= 1.2MPa$	59

Figure 5-2: Test de mesure effectué sur le module MTE-2-1 pour $\Delta t=10s$, $\Delta T=160^{\circ}C$ et $P=1.2MPa$	60
Figure 5-3: Test de mesure effectué sur le module MTE-2-1 pour $\Delta t=20s$, $\Delta T=160^{\circ}C$ et $P=1.2MPa$	60
Figure 5-4: Test de mesure effectué sur le module MTE-2-1 pour $\Delta t=40s$, $\Delta T=160^{\circ}C$ et $P=1.2MPa$	61
Figure 5-5: Modèle d'un circuit équivalent électrique (en noir) et thermique (en rouge) dans un thermocouple	63
Figure 5-6: Variation de la température du bloc chaud en fonction du courant à différentes Δt pour le module MTE-2-1	64
Figure 5-7 : Caractéristiques courant-tension (en bleu) et courant-puissance (en rouge) pour le module MTE-1.5-1, obtenues à $T_C=50^{\circ}C$ et $T_H=150^{\circ}C$	65
Figure 5-8 : Évolution de la puissance maximale en fonction de la pression appliquée sur les modules MTE-1.5-2 et MTE-1.5-3 à $T_C=50^{\circ}C$ et $T_H=150^{\circ}C$	70
Figure 5-9: Variation du courant en court circuit en fonction de la longueur des pattes du MTE et de la différence de température	73
Figure 5-10: Variation du flux de chaleur en fonction de la longueur des pattes du MTE et de la différence de température	74
Figure 5-11: Schéma décrivant les conductances thermiques dans un thermocouple appartenant au modèle plus «réaliste»	75
Figure 5-12: Variation de la tension à circuit ouvert en fonction de la longueur des pattes du MTE et de la différence de température	77
Figure 5-13: Variation de la puissance maximale en fonction de la longueur des pattes du MTE et de la différence de température	78
Figure 5-14: Variation de l'efficacité en fonction de la longueur des pattes du MTE et de la différence de température	81

Figure 5-15: Variation de la puissance générée P/NA et l'efficacité de conversion d'un MTE ϕ en fonction de la longueur des pattes [36]	82
Figure 5-16: Variation schématique des propriétés thermoélectriques des matériaux en fonction de la concentration des porteurs de charge [37]	84
Figure 5-17: Évolution de I_{CC} en fonction du temps de stabilisation Δt pour le module MTE-1.5-1A dans le système d'assemblage	88
Figure 5-18: Test de reproductibilité des modules dans le système d'assemblage des MTE	89
Figure 5-19: Positions schématiques des modules et des thermocouples dans le système d'assemblage des MTE	90
Figure 5-20: Distribution de la température le long des blocs chaud et froid quand le contrôle de la température est effectué par l'intermédiaire du thermocouple placé dans la position 3	92
Figure 5-21: Évolution de la puissance maximale en fonction de la pression pour les modules MTE-1.5-1A et MTE-1.5-2A mesurés dans le système d'assemblage des MTE, à $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$	94
Figure 5-22: Caractéristiques I-V pour des assemblages en série de MTE ($n=1, 2, 3, 4, 5$) à $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$, à une pression $P=1.76\text{ MPa}$	96
Figure 5-23: Schéma du branchement d'un module TE avec le régulateur électronique de charge «B&K precision 8500» et le voltmètre «Wavetek 15XL»	98
Figure 5-24: Caractéristiques I-V obtenues avec une tension mesurée par «B&K precision 8500» (en bleu) et une tension mesurée par un voltmètre «Wavetek 15XL» (en rouge), dans le système d'assemblage des MTE à $T_C=38^\circ\text{C}$ et $T_H=138^\circ\text{C}$ pour le module MTE-1.5-1A	99
Figure 5-25: Évolution de la tension en circuit ouvert en fonction du nombre de module du «lot 3» connectés en série pour $T_C=38^\circ\text{C}$ et $T_H=138^\circ\text{C}$	100
Figure 5-26: Comparaison des caractéristiques I-V entre les mesures expérimentales et les prédictions pour un assemblage de deux, trois et quatre MTE du «lot 3» en série	102
Figure 5-27: Circuit équivalent de deux modules branchés en parallèles pour mesurer la tension en circuit ouvert	103

Figure 5-28: Caractéristiques I-V pour des assemblages de MTE du «lot 3» en parallèle ($n=2, 3$ et 4) à $T_C=38^\circ\text{C}$ et $T_H=138^\circ\text{C}$	104
Figure 5-29: Caractéristiques I-V (en bleu) et courant-puissance (en rouge) pour le module MTE-1.5-1, obtenues à $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$ dans le système d'assemblage des MTE.....	106
Figure 5-30: Caractéristiques I-V (en bleu) et courant-puissance (en rouge) pour le module MTE-1.5-1, obtenues à $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$ dans le système de mesure d'un MTE	107

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Section du thermocouple dans un module thermoélectrique (m^2)
C_s	Couple de serrage (N.m)
ÉPM	École Polytechnique de Montréal
F	Force appliquée au bout d'un bras de levier (N)
F_0	Force de pré-charge appliquée sur un module (N)
GTE	Générateur thermoélectrique
I	Courant électrique (A)
I_{CC}	Courant en court circuit (A)
I_{MAX}	Courant maximal produit par le module lors d'un test de mesure (A)
K	Conductance thermique (W/K)
K_{Cu}	Conductance thermique du cuivre (W/K)
$K_{c\acute{e}ramique}$	Conductance thermique de la céramique (W/K)
K_{pattes}	Conductance thermique des pattes du module (W/K)
l	Longueur des pattes d'un MTE (mm)
MTE	Module thermoélectrique
N	Nombre de thermocouples dans un module thermoélectrique
n	Nombre de modules connectés électriquement ensemble
P	Pression appliquée sur le module (MPa)
P_{MTE}	Puissance électrique générée par un module thermoélectrique (W)

P_{MAX}	Puissance maximale générée par un module thermoélectrique (W)
PID	Proportionnel, intégral, dérivé
Q	Flux de chaleur (W)
Q_{MAX}	Flux de chaleur maximal enregistré lors d'un test (W)
R	Résistance électrique totale d'un module thermoélectrique (Ω)
R_C	Résistance électrique de contact dans un module thermoélectrique (Ω)
R_e	Résistance électrique des pattes dans un module thermoélectrique (Ω)
R_L	Résistance de charge externe (Ω)
Θ	Résistance thermique totale d'un module thermoélectrique (K/W)
TE	Thermoélectrique
TEM	Thermoelectric module
TC	Thermocouple
T_C	Température du côté froid ($^{\circ}\text{C}$)
T_H	Température du côté chaud ($^{\circ}\text{C}$)
V_{MTE}	Tension électrique d'un module thermoélectrique (V)
V_{MAX}	Tension maximale d'un module lors d'un test de mesure (V)
V_{OC}	Tension en circuit ouvert (V)
V_J	Tension Joule (V)
V_{α}	Tension Seebeck (V)
ZT	Figure de mérite

α	Coefficient de Seebeck ($V.K^{-1}$)
β	Coefficient de Thomson ($V.K^{-1}$)
π	Coefficient de Peltier (V)
ρ	Résistivité électrique ($\Omega.m$)
λ	Conductivité thermique ($W.K^{-1}.m^{-1}$)
σ	Conductivité électrique ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)
ΔT	Différence de température ($^{\circ}C$)
Δt	Durée d'une étape de mesure (s)
Δi	Pas du courant (A)
η	Efficacité d'un module thermoélectrique (%)
η_{MAX}	Efficacité maximale d'un module thermoélectrique enregistrée lors d'un test (%)
η_{PM}	Efficacité à puissance maximale (%)

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – LOGICIEL «LOADVUE»	117
ANNEXE B - LOGICIEL «EFFICACITÉ 2009»	118
ANNEXE C – PROTOCOLE DE MESURE DANS LE SYSTÈME D’ASSEMBLAGE	121
ANNEXE D – MESURES DES MODULES DU «LOT 1» ET «LOT 2»	122
ANNEXE E – PROCÉDURE DE CALCUL DE LA PRESSION MÉCANIQUE	124
ANNEXE F – RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE D’UN ASSEMBLAGE DE MTE EN SÉRIE ...	129

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le développement économique de notre société résultera de façon inévitable en une grande croissance de la demande énergétique mondiale. Parmi les sources de production d'énergies les plus importantes, on cite les énergies fossiles. Ce type d'énergie est en épuisement progressif, d'où la nécessité de diversifier les sources d'énergie et d'avoir recours à d'autres alternatives. Parmi les énergies renouvelables, on retrouve le photovoltaïque ou l'éolien. Ces différentes sources entraînent l'abondance de l'énergie thermique. Or, la production de la chaleur n'est pas toujours souhaitée puisqu'une grande quantité est rejetée dans l'atmosphère.

Dans ce contexte, la thermoélectricité représente un moyen de convertir l'énergie thermique en énergie électrique. Ainsi, elle apparaît comme un moyen efficace pour récupérer la chaleur perdue et la transformer en énergie électrique.

Les systèmes de conversion thermoélectriques (TE) sont des dispositifs appelés modules thermoélectriques, qui sont capables soit de générer de l'électricité à partir d'une source de chaleur (modules générateurs d'électricité GTE), ou encore produire une différence de température en présence d'un courant électrique (modules de refroidissement). Ces dispositifs sont en voie de développement à grande échelle. Comme ils présentent un faible rendement, ceci les empêche d'être compétitifs et de concurrencer les systèmes de conversion à forte puissance thermique. Toutefois, ils possèdent certains atouts comme la facilité de leur intégration dans les systèmes compacts ainsi que leur fiabilité. Ces dispositifs sont formés par des matériaux semi-conducteurs de type p et n reliés électriquement en série. Les matériaux TE sont caractérisés par leur figure de mérite ZT qui doit être maximisée pour assurer une meilleure conversion TE. C'est pour cela que la recherche de nouveaux matériaux TE performants s'est fortement intensifiée ces dernières années. Ces recherches visent à améliorer les propriétés TE de ces matériaux par différents moyens : le choix de la composition des alliages, le dopage, la nano structuration, etc..

L'obtention des matériaux TE performants ouvre d'autres portes à la recherche et le développement dans le domaine de la thermoélectricité, à savoir la conception des modules de conversion plus efficaces. Pour ce faire, il devient indispensable de maîtriser la caractérisation des modules TE formés par ces matériaux qui permettra d'évaluer l'efficacité de conversion de ces dispositifs pour une différence de température donnée.

La problématique qui se présente dans ce contexte est qu'il n'existe pas, jusqu'à nos jours, de consensus sur un protocole de mesure permettant d'assurer l'exactitude des mesures des modules TE. Pour cela, nous proposons l'évaluation de deux systèmes de mesure dans ce projet, et nous effectuerons une simulation numérique d'un module TE qui permettra de le caractériser théoriquement, ce qui constitue un moyen pour comparer les mesures expérimentales effectuées.

Le but des travaux de ce mémoire de maîtrise est la caractérisation thermoélectrique des modules générateurs, en ayant recours à une approche expérimentale basée sur la production d'une différence de températures aux surfaces du module, réalisée par l'utilisation de deux différents systèmes de mesure des modules TE. Plus spécifiquement, il serait question de présenter une méthode pour évaluer les paramètres fondamentaux d'un module TE générateur d'électricité en opération. Les modules utilisés dans cette étude sont des modules générateurs d'électricité, fabriqués par des alliages à base de (BiTe) élaborés au laboratoire de thermoélectricité de l'École Polytechnique de Montréal (ÉPM).

Le défi serait de comprendre le fonctionnement des systèmes de mesures, qui sont conçus à l'ÉPM, ainsi que la réponse thermoélectrique des dispositifs de conversion pour s'assurer de la performance de ces modules TE.

Le deuxième chapitre de ce mémoire portera sur les phénomènes et concepts thermoélectriques. Nous introduirons les effets TE, puis nous présenterons un survol sur les matériaux TE. Nous verrons les équations et les relations qui régissent la thermoélectricité et qui sont nécessaires dans la caractérisation d'un module TE, et nous exposerons les différents modèles existants d'un module TE. Enfin, quelques applications de la thermoélectricité seront présentées à la fin de ce chapitre.

Le troisième chapitre présentera une revue bibliographique où nous exposerons les différents systèmes de mesures des modules TE utilisés dans la littérature. Ce chapitre sera principalement divisé en deux parties : une première partie s'intéressera aux travaux effectués pour la caractérisation des modules par un système de mesure d'un seul module TE. La deuxième partie portera sur les travaux réalisés pour une caractérisation à la fois de plusieurs modules par des systèmes d'assemblage de modules TE.

Le quatrième chapitre exposera l'approche expérimentale suivie dans ce projet. Une description détaillée du système de mesure des modules TE (système capable de mesurer un seul module à la fois) sera présentée, suivie d'une description détaillée du système d'assemblage des

modules TE (système capable de mesurer plusieurs modules TE connectés électriquement en série ou en parallèle).

Le cinquième chapitre traitera les résultats expérimentaux obtenus. Une première étude sera consacrée à la caractérisation d'un module (MTE) dans le système capable de mesurer un seul MTE : tout d'abord, une évaluation des paramètres TE mesurés lors de la caractérisation d'un module sera présentée. Puis, nous étudierons l'influence de la pression mécanique sur la performance du module. Ensuite, nous ferons une comparaison des paramètres TE déterminées pour deux catégories de modules qui diffèrent par la longueur de patte. Enfin, une comparaison de nos résultats avec les données du fabricant sera discutée, suivie d'une validation du système de mesure.

Une deuxième section s'intéressera à la discussion des résultats obtenus par la caractérisation des modules dans le système d'assemblage des MTE. Nous discuterons l'effet de la position du MTE dans le système d'assemblage sur sa performance. Puis, une étude de la pression mécanique sera exposée où nous introduirons une méthode de calcul de cette pression. Enfin, nous verrons l'effet d'un assemblage en série et en parallèle des modules sur la puissance générée. Une comparaison entre les résultats obtenus pour un module TE par les deux systèmes de mesure viendra clore ce chapitre.

CHAPITRE 2 PHÉNOMÈNES ET CONCEPTS THERMOÉLECTRIQUES

2.1 Phénomènes thermoélectriques

La thermoélectricité est la transformation de la chaleur en électricité. Elle fut découverte en 1821 par le physicien allemand Seebeck [1]. On peut définir l'effet thermoélectrique comme étant un effet qui lie le flux de chaleur traversant le matériau au courant électrique qui le parcourt. On cite alors l'effet Seebeck, l'effet Peltier et l'effet Thomson. Cet effet ne doit pas être confondu avec l'effet pyroélectrique, qui est défini comme l'apparition d'une différence de potentiel temporaire suite à un changement de température, et qui disparaît après le temps de relaxation diélectrique.

2.1.1 L'effet Seebeck

Le physicien Thomas Johann Seebeck a observé l'effet Seebeck quand il a remarqué la déviation d'une aiguille placée entre deux matériaux conducteurs de natures différentes dont les jonctions étaient exposées à des températures $T_1 \neq T_2$. Au début, il attribua ce phénomène au magnétisme, mais c'est plus tard qu'il expliqua que ceci était dû à l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction des deux matériaux.

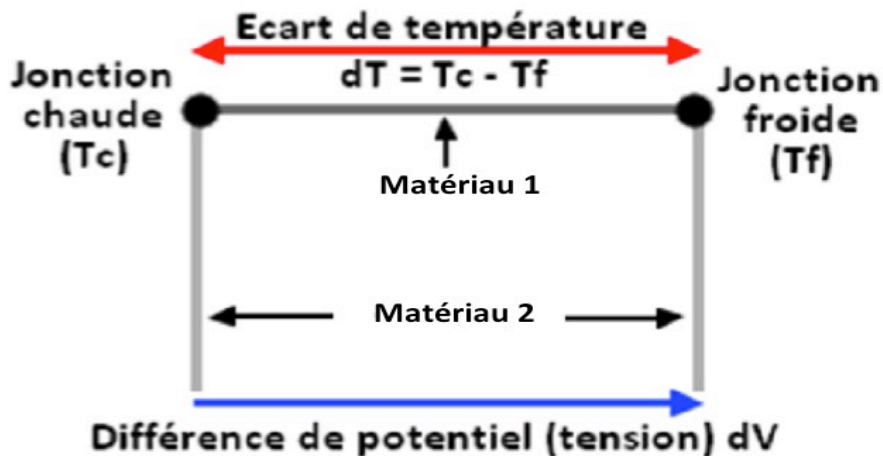


Figure 2-1: Effet Seebeck [2]

En effet, quand il existe une différence de température entre deux jonctions formées par deux matériaux différents, il y a création d'une différence de potentiel électrique ΔV [3] (figure 2-1). Le coefficient de Seebeck α_{21} mesuré à une jonction représente la différence entre les coefficients de Seebeck des deux matériaux α_1 et α_2 formant la jonction. Ils sont liés par la relation suivante :

$$\Delta V = (\alpha_2 - \alpha_1)(T_H - T_C) = \alpha_{21}\Delta T \quad (\text{équation 2.1})$$

Où $T_H - T_C$ représente la différence ΔT entre la température chaude et la température froide.

2.1.2 L'effet Peltier

L'effet Peltier fut découvert en 1834 par Jean Charles Peltier. Il représente l'inverse de l'effet Seebeck. Un courant électrique circulant à travers les jonctions de deux matériaux de nature différente génère une hausse de la température pour l'une des jonctions et une baisse de la température pour l'autre [1]. Ainsi, une quantité de la chaleur est absorbée à une jonction tandis qu'à l'autre jonction, il y a libération de la chaleur. La figure 2-2 montre qu'une jonction est chauffée et que l'autre est refroidie lors du passage du courant.

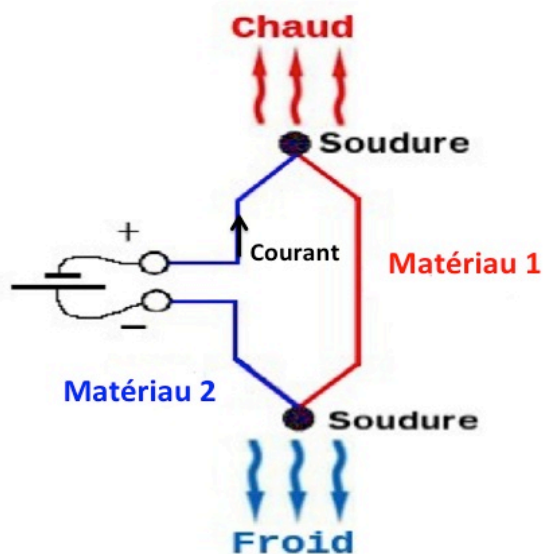


Figure 2-2: Effet Peltier [4]

Les coefficients Peltier des deux matériaux 1 et 2, notés respectivement π_1 et π_2 peuvent être définis:

$$Q_1 = \pi_1 I \quad \text{et} \quad Q_2 = \pi_2 I \quad (\text{équation 2.2})$$

Si on considère la quantité de chaleur Q_{21} à une jonction, on écrit :

$$Q_{21} = (\pi_2 - \pi_1) I = \pi_{21} I \quad (\text{équation 2.3})$$

Avec Q : quantité de chaleur dégagée ou absorbée

I : courant qui circule à travers la jonction

Comme l'effet Seebeck est l'inverse de l'effet Peltier [5], il existe une relation qui relie les deux phénomènes :

$$\alpha_{21} = \frac{\pi_{21}}{T} \quad (\text{équation 2.4})$$

2.1.3 L'effet Thomson

L'effet Thomson fut découvert en 1851 par William Thomson. Cet effet résulte de l'apparition simultanée d'un courant électrique et d'un gradient de température à travers un matériau qui génère l'absorption ou l'émission de la chaleur dans chacune de ses parties [6].

On note la chaleur générée par unité de longueur :

$$Q = \beta I \Delta T \quad (\text{équation 2.5})$$

Où β est le coefficient Thomson. Notons que Q est différente de la chaleur produite par l'effet Peltier présentée dans les équations 2.2 et 2.3.

Il existe une relation entre le coefficient Thomson et le coefficient de Seebeck :

$$\beta_{21} = T \frac{d\alpha_{21}}{dT} \quad (\text{équation 2.6})$$

2.2 Survol sur les matériaux thermoélectriques

Un matériau thermoélectrique est caractérisé essentiellement par son coefficient de Seebeck α (ou pouvoir thermoélectrique) qui est une mesure de l'entropie par unité de charge transportée par les porteurs de charge. L'autre paramètre caractéristique des matériaux TE est le facteur de mérite ZT (quantité sans dimensions) qui évalue la performance du matériau et s'exprime comme [7]:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} T \quad (\text{équation 2.7})$$

Où :

σ la conductivité électrique ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

λ la conductivité thermique (W/m.K)

α le coefficient Seebeck (V.K^{-1})

T la température absolue (K)

D'un point de vue qualitatif, on peut remarquer qu'un matériau TE performant doit présenter un coefficient de Seebeck optimal (se situant entre 130 à 187 $\mu\text{V.K}^{-1}$ [8]) pour produire les effets attendus, une conductivité électrique élevée ($\sigma = 850 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ pour un matériau TE à base de tellure de bismuth $(\text{Bi}_{0.2}\text{Sb}_{0.8})_2\text{Te}_3$ à 300 K [9]) ainsi qu'une faible conductivité thermique ($\lambda \leq 1.2 \text{W/m.K}$ pour le composé $(\text{Bi}_{0.2}\text{Sb}_{0.8})_2\text{Te}_3$ [9]) pour maintenir une différence de température appropriée aux bornes du matériau. C'est pour cela que les semi-conducteurs sont considérés comme les meilleurs matériaux thermoélectriques (tableau 2-1) puisqu'ils présentent un compromis entre les propriétés de transport thermique et électrique.

Par ailleurs, l'augmentation de la conductivité électrique réduit la perte de puissance électrique produite par effet Joule, et la diminution de la conductivité thermique réduit la quantité de chaleur qui passe par le matériau sans avoir été convertie en puissance.

Le tableau 2-1 nous donne une idée sur les valeurs typiques des paramètres thermoélectriques pour les matériaux isolants, semi-conducteurs et les métaux.

Tableau 2-1: Valeurs typiques des paramètres thermoélectriques pour les isolants, les semi-conducteurs et les métaux [10]

Paramètre	<i>Isolants</i>	<i>Semi conducteurs</i>	<i>Métaux</i>
α ($\mu\text{V.K}^{-1}$)	~ 1000	~ 200	~ 5
σ ($\Omega^{-1}.\text{m}^{-1}$)	$\sim 10^{-10}$	$\sim 10^5$	$\sim 10^8$
λ (W/m.K)	$\sim 0.1 - 1$	$\sim 1 - 100$	$\sim 10 - 1000$

L'optimisation du paramètre ZT (la valeur maximale en fonction de la température) a évolué au cours du temps. En effet, il s'est avéré que les métaux n'étaient pas des candidats performants dans le domaine de la thermoélectricité en raison de leur conductivité thermique élevée (voir tableau 2-1). La recherche des matériaux TE performants s'est intensifiée vers les années 1950 avec l'apparition des semi-conducteurs. Il était possible de trouver un compromis entre une conductivité électrique élevée et une conductivité thermique faible au sein d'un même matériau, comme on peut le constater d'après le tableau 2-1.

Parmi les matériaux TE les plus performants, on cite les alliages à base de tellure de bismuth (Bi_2Te_3) pour des applications proches à la température ambiante, Pb-Te ainsi que Si-Ge pour des applications à des températures plus élevées. Beaucoup de recherches ont été menées sur ces alliages en faisant un dopage (dopage n et p). Ainsi, on assiste à l'apparition des composés quaternaires à base de bismuth, d'antimoine, de tellure et de sélénium $(\text{Bi,Se})_2(\text{Te,Sb})_3$ qui présentent des propriétés TE performantes [11]. La figure 2-3 illustre la courbe de ZT en fonction de la température pour différents matériaux nanostructurés. On constate que la valeur de ZT augmente au fur et à mesure que la température augmente, pour un matériau donné, jusqu'à atteindre un pic. Il est important de noter que chaque famille de matériaux n'est efficace que sur une plage de température limitée.

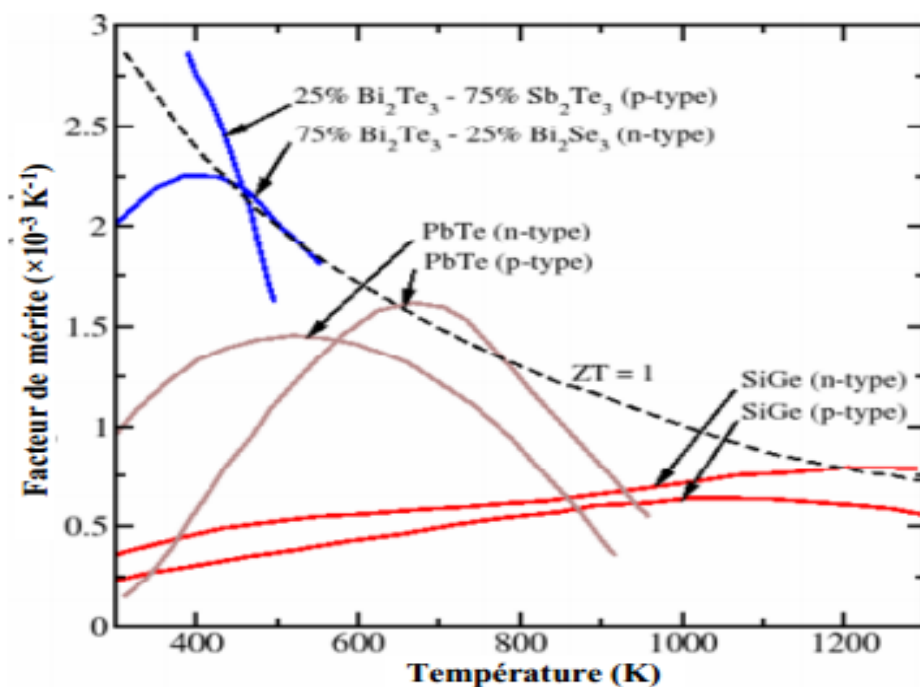


Figure 2-3: Figures de mérite ZT pour différents matériaux thermoélectriques [12]

Cependant, ce n'est qu'à partir des années 1990 que de nouvelles méthodes basées sur la nano structuration des matériaux sont apparues (figure 2-4). Ainsi, le développement de nouveaux matériaux TE ne cesse d'augmenter dans le but d'optimiser le paramètre ZT et découvrir d'autres éventuelles applications pour la thermoélectricité.

Notons que sur la courbe de la figure 2-4, la valeur de ZT pour chaque matériau correspond à la valeur de la figure de mérite maximale atteinte.

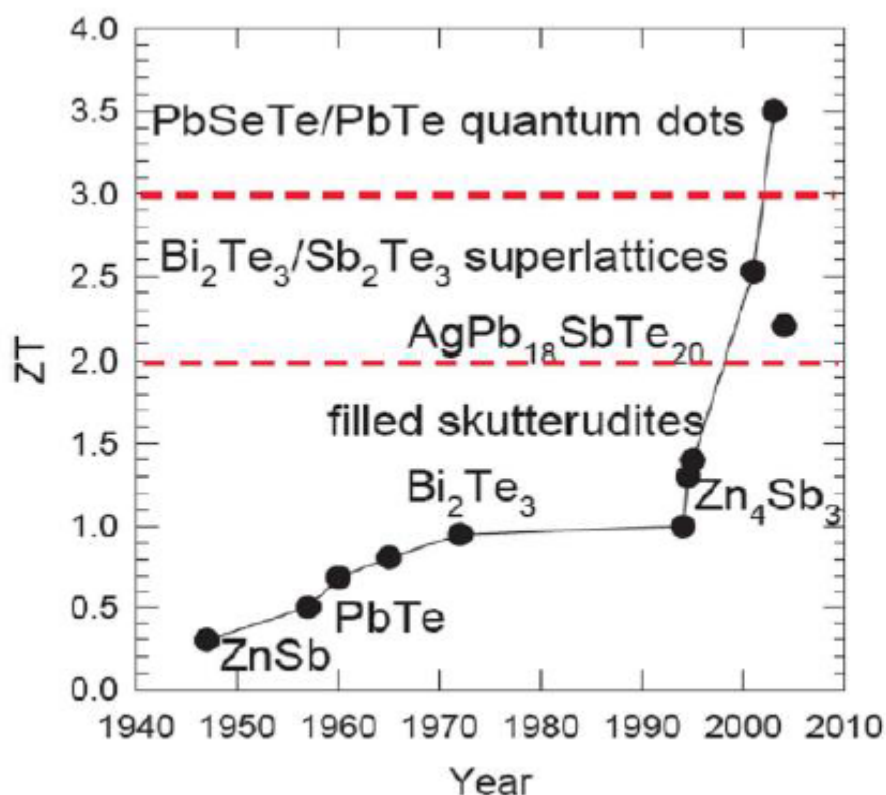


Figure 2-4 : Évolution de la figure de mérite maximale ZT [13]

2.2.1 Propriétés des matériaux TE utilisés dans ce projet

Les matériaux composant les modules TE utilisés dans ce projet ont été élaborés au laboratoire de thermoélectricité de l'ÉPM. La première étape du procédé expérimental est de produire l'alliage voulu par mécanosynthèse en partant des éléments purs (99.99%). La deuxième étape consiste à extruder à chaud les alliages élaborés pour obtenir une tige. L'extrusion à chaud constitue un procédé de mise en forme qui permet d'obtenir le profilé voulu par l'utilisateur [14].

Ces matériaux sont des alliages de $(\text{Bi}, \text{Sb})_2 (\text{Te}, \text{Se})_3$ (de type p et de type n) dont les propriétés sont regroupés dans le tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Exemples des propriétés de transport des alliages $(\text{Bi, Sb})_2(\text{Te, Se})_3$ de type p et de type n à température ambiante

Composé	Température (K)	ρ ($\mu\Omega\cdot\text{m}$)	α ($\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$)	λ (W/m.K)	ZT
Semi-conducteur de type p	298	6.76	171.8	1.57	0.85
Semi-conducteur de type n	298	8.02	-169	1.37	0.78

2.3 Configuration des modules thermoélectriques

Un module thermoélectrique est un dispositif composé de plusieurs thermocouples. Chaque thermocouple contient deux pattes : une patte formée par un semi-conducteur de type p et l'autre par un semi-conducteur de type n . Ces pattes sont reliées par des contacts de cuivre, qui est un bon conducteur électrique, ce qui permet de réduire l'effet Joule qui influe sur la performance du module.

L'ensemble de ces pattes est couvert par deux plaques de céramique qui permettent de maintenir en place l'assemblage des thermocouples et qui assurent une conduction de la chaleur acceptable ainsi qu'une bonne isolation électrique. Les pattes sont alors connectées thermiquement en parallèle et électriquement en série. L'alternance des pattes et des plaques de cuivre forme un circuit électrique.

La figure 2-5 montre l'exemple d'un module conventionnel. Il existe, par ailleurs, d'autres types d'assemblage comme dans les micromodules TE. Notons que les flèches dans le thermocouple représentent le sens du flux de chaleur traversant le module.

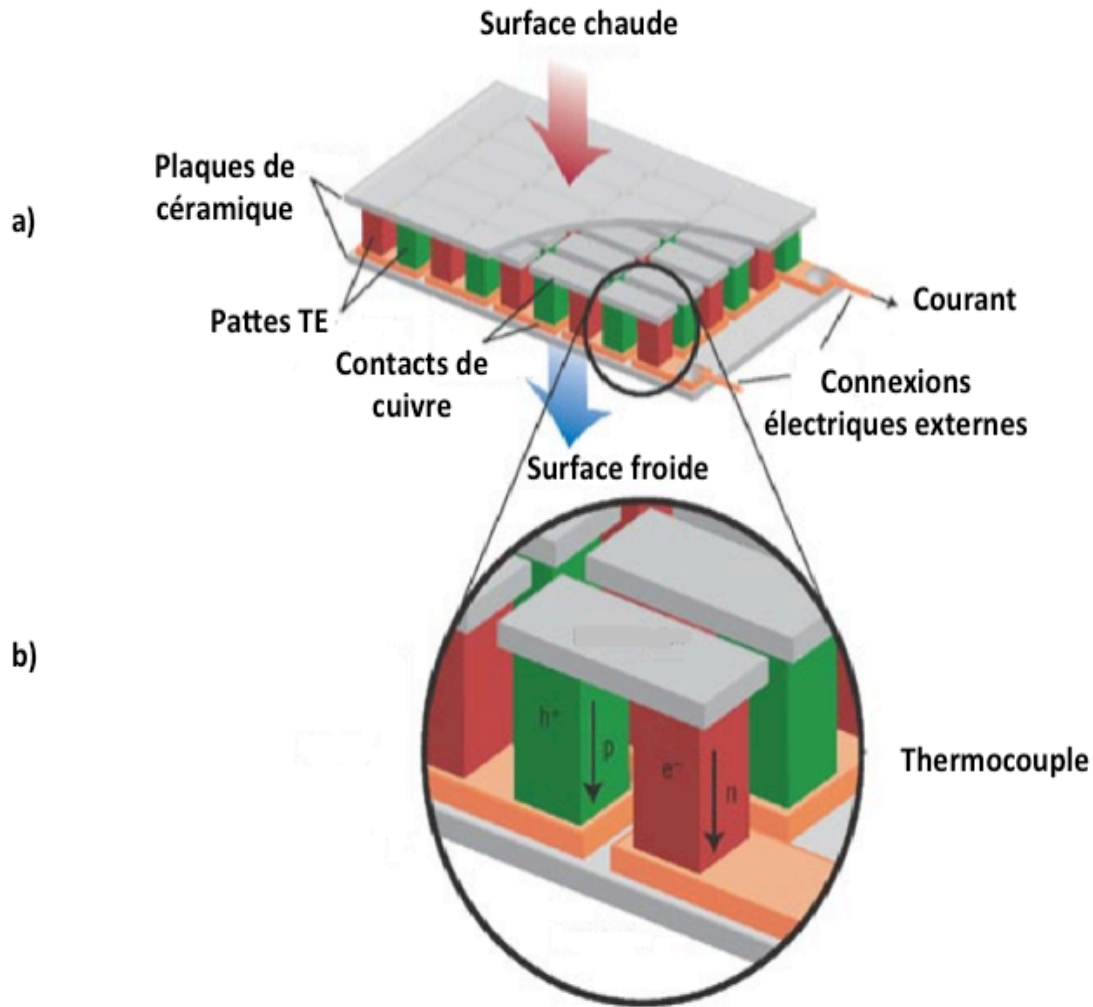


Figure 2-5 : a) Module thermoélectrique, b) Thermocouple [15]

Il existe deux types d'applications de modules thermoélectriques. On retrouve les modules soumis à un gradient de température qui peuvent servir à la génération d'un courant électrique qu'on appelle les modules générateurs, et les modules servant à la production d'un flux de chaleur nommés les modules de refroidissement. Durant cette étude, nous allons nous focaliser sur les modules générateurs.

2.3.1 Modèle «idéal»

Le modèle « idéal » d'un module (figure 2-6) est composé par des pattes TE de type p et n . Les connections entre ces pattes de longueur l sont assurées par des conducteurs électriques et thermiques parfaits et les résistances de contacts sont négligeables. ΔT_0 représente la différence de température à travers les pattes TE.

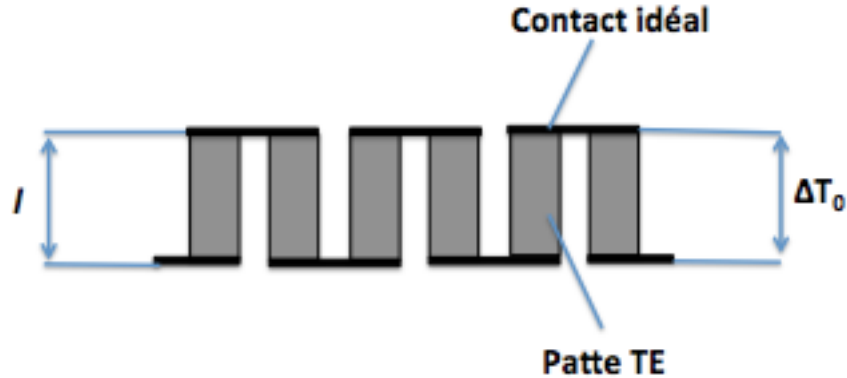


Figure 2-6 : Schéma du modèle «idéal» d'un MTE

Pour un module générateur du modèle « idéal », le flux de chaleur échangé avec la jonction chaude ou froide du module représente la somme de la contribution de l'effet Peltier, la conductance thermique et les pertes par effet Joule, et s'exprime comme [16] :

$$Q_H = N\alpha_{pn}T_H I + NK_e\Delta T_0 - \frac{N}{2}I^2 R_e \quad (\text{équation 2.8})$$

$$Q_C = N\alpha_{pn}T_C I + NK_e\Delta T_0 + \frac{N}{2}I^2 R_e \quad (\text{équation 2.9})$$

La conductance thermique K_e et la résistance électrique interne R_e du thermocouple s'écrivent comme :

$$K_e = \frac{\lambda_{pn}A}{l} \quad (\text{équation 2.10})$$

$$R_e = \frac{\rho_{pn} l}{A} \quad (\text{équation 2.11})$$

Où α_{pn} est la différence entre les coefficients de Seebeck des deux matériaux formant la jonction α_p et α_n , N est le nombre de thermocouples formant le module, T_H et T_C représentent, respectivement, la température de la surface chaude et la température de la surface froide du MTE, λ_{pn} représente la conductivité thermique des semi conducteurs de type p et n en parallèle ($\lambda_{pn} = \lambda_p + \lambda_n$), ρ_{pn} est la résistivité électrique des matériaux p et n en série ($\rho_{pn} = \rho_p + \rho_n$), A est la section du thermocouple et l est la longueur des pattes du MTE.

À partir des équations 2.8 et 2.9, on peut remonter à l'expression de la puissance électrique générée par un module thermoélectrique puisque :

$$P_{MTE} = Q_H - Q_C \quad (\text{équation 2.12})$$

Ainsi, la puissance s'écrit :

$$P_{MTE} = N\alpha_{pn} I \Delta T_0 - N R_e I^2 \quad (\text{équation 2.13})$$

En outre, l'efficacité de conversion d'un module thermoélectrique peut être définie comme étant le rapport de la puissance électrique P_{MTE} produite dans le circuit sur la quantité de chaleur absorbée [17] :

$$\eta = \frac{P_{MTE}}{Q_H} \quad (\text{équation 2.14})$$

Par ailleurs, il est possible de déterminer la puissance électrique maximale dans le cas du modèle « idéal » P_{MAX}^* (c'est la puissance optimale obtenue pour $dP_{MTE}/dR_L=0$ où R_L est la résistance de charge externe) [18]:

$$P_{MAX}^* = \frac{N(\alpha_{pn} \Delta T_0)^2}{R_e} \quad (\text{équation 2.15})$$

D'autre part, il est important de présenter certains paramètres nécessaires dans l'étude des modules TE comme la tension V_{MTE} . En effet, la tension mesurée aux bornes du module TE est composée de deux termes : la tension Joule V_J et la tension Seebeck V_α , et s'écrit comme :

$$V_{MTE} = V_J + V_\alpha \quad (\text{équation 2.16})$$

La tension Joule qui est due à la résistance électrique du module s'exprime à partir de la loi d'Ohm :

$$V_J = -NR_e I \quad (\text{équation 2.17})$$

La tension Seebeck qui résulte de la différence de température à travers le module TE est définie comme :

$$V_\alpha = N\alpha_{pn} \Delta T_0 \quad (\text{équation 2.18})$$

Ainsi, la tension aux bornes du module s'exprime par la relation suivante :

$$V_{MTE} = -NR_e I + N\alpha_{pn} \Delta T_0 \quad (\text{équation 2.19})$$

On note que la tension en circuit ouvert V_{OC} (obtenue pour un courant nul) est égale à la tension Seebeck. Elle demeure fixe si la différence de température à travers le module reste stable.

2.3.2 Modèle «réaliste»

Contrairement au modèle « idéal », un modèle plus «réaliste» de modules TE (figure 2-7) est un modèle qui prend en compte la présence des deux plaques de céramiques qui couvrent l'ensemble des thermocouples, ainsi que la présence des résistances électriques de contact entre les pattes du module et les plaques de cuivre.

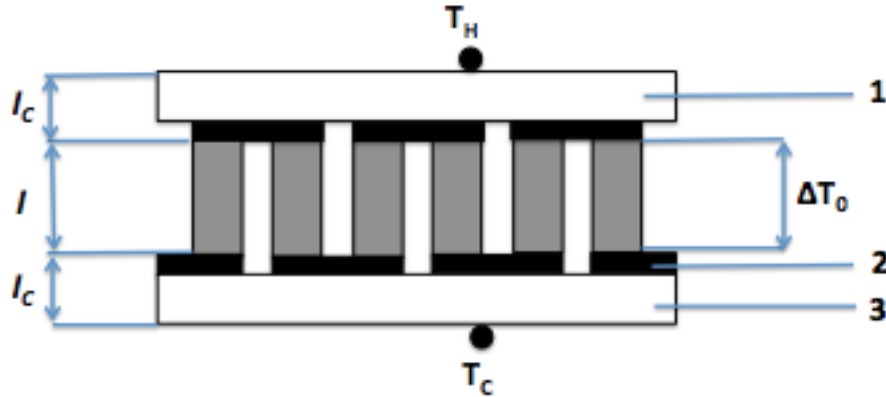


Figure 2-7 : Modèle «réaliste» d'un MTE : 1-Plaque de céramique (côté chaud), 2- Couche de cuivre, 3- Plaque de céramique (côté froid)

En effet, quand la présence des plaques de céramiques est considérée, il faut tenir compte de la conductivité thermique de la céramique λ_c qui s'ajoute à la conductivité thermique des pattes λ_{pn} . Ainsi, puisque les contacts (céramique plus cuivre) sont thermiquement en série avec les pattes, on peut écrire :

$$\frac{l_T}{\lambda_T} = \frac{l}{\lambda_{pn}} + \frac{2l_c}{\lambda_c} \quad (\text{équation 2.20})$$

Où, l_T est la longueur totale du module ($l_T = l + 2l_c$) et l_c est l'épaisseur des contacts de cuivre et des plaques de céramique. Alors, cette définition de λ_T , une conductivité thermique effective, permettra d'obtenir la relation entre la différence de température aux deux surfaces du module ($T_H - T_C$) et la différence de température à travers les thermocouples ΔT_0 .

En effet, s'il n'y a pas de pertes par radiation, le flux de chaleur traversant le module est constant pour les deux différences de températures, ce qui permet d'écrire:

$$\frac{\lambda_T A}{l_T} (T_H - T_C) = \frac{\lambda_{pn} A}{l} \Delta T_0 \quad (\text{équation 2.21})$$

À partir des équations 2.20 et 2.21, la relation entre ΔT_0 et $(T_H - T_C)$ s'exprime comme :

$$\Delta T_0 = \frac{T_H - T_C}{1 + 2r \frac{l_c}{l}} \quad (\text{équation 2.22})$$

Où $r = \lambda_{pn}/\lambda_C$

De même, si on prend compte des résistances de contact électrique, la résistance électrique effective R s'écrit comme la somme de la résistance des pattes R_e et la résistance de contact R_C :

$$R = R_e + R_c = \frac{\rho_{pn} l}{A} (1 + n \frac{l_c}{l}) \quad (\text{équation 2.23})$$

Où $n = 2\rho_C/\rho_{pn}$

La tension aux bornes du module, en tenant compte des plaques de céramique et des différentes résistances électriques, s'écrit comme suit :

$$V_{MTE} = N\alpha_{pn} \frac{(T_H - T_C)}{1 + 2r \frac{l_c}{l}} - NRI \quad (\text{équation 2.24})$$

Par conséquent, il est possible d'écrire les expressions de la tension en circuit ouvert V_{OC} et du courant en court circuit I_{CC} :

$$V_{OC} = \frac{N\alpha_{pn}(T_H - T_C)}{(1 + 2r \frac{l_c}{l})} \quad (\text{équation 2.25})$$

$$I_{CC} = \frac{\alpha_{pn}(T_H - T_C)}{R(1 + 2r \frac{l_c}{l})} \quad (\text{équation 2.26})$$

En substituant les équations 2.22 et 2.23 dans l'équation 2.15, on trouve que la puissance électrique maximale dans ce modèle plus « réaliste » P_{MAX} dépend de certains paramètres à savoir : la différence de température entre la face chaude et la face froide du module ($T_H - T_C$), le nombre de thermocouples N ainsi que des propriétés relatives aux pattes constituant les thermocouples comme : la section A , la longueur des pattes l et l'épaisseur des plaques de cuivre et de la céramique l_C [19].

$$P_{MAX} = \frac{N\alpha_{pn}^2 A(T_H - T_C)^2}{4\rho_{pn} l(1 + n\frac{l_c}{l})(1 + 2r\frac{l_c}{l})^2} \quad (\text{équation 2.27})$$

L'efficacité de conversion du MTE peut alors s'exprimer en fonction du facteur de mérite ZT et s'écrit comme [20]:

$$\eta = \frac{(\frac{T_H - T_C}{T_H})(1 + 2r\frac{l_c}{l})^{-2}}{[2 - \frac{1}{2}(\frac{T_H - T_C}{T_H}) + \frac{4}{ZT_H}(\frac{l + nl_c}{l + 2rl_c})]} \quad (\text{équation 2.28})$$

Ces différentes équations présentent les paramètres indispensables dans la caractérisation des modules thermoélectriques qui fait l'objet de notre étude. Dans ce projet, on présente une méthode pour évaluer la réponse thermoélectrique de ces dispositifs en se basant sur les lois TE, plus spécifiquement, l'effet Seebeck puisqu'on caractérise le module en appliquant une différence de température à ses deux surfaces.

En effet, pour comparer la performance entre deux modules TE, on a généralement recours à la comparaison de la tension en circuit ouvert (V_{OC}), le courant en court-circuit (I_{CC}), la puissance électrique maximale générée (P_{MAX}), le flux de chaleur (Q_H) ainsi que l'efficacité (η).

Les nombreuses recherches faites dans le domaine de la thermoélectricité ont permis de développer des systèmes de mesure qui servent à la caractérisation des modules TE [21]. Ainsi, d'une part, le système de mesure introduit dans ce projet nous présentera des données expérimentales permettant de le valider et de l'améliorer, et d'autre part, les tests faits sur ces modules permettront, quant à eux, une meilleure compréhension de la réponse thermoélectrique de ces dispositifs et le développement d'autres voies dans leur conception.

2.4 Les applications de la thermoélectricité

Les modules TE présentent, d'une part, certains avantages. En effet, ils sont assez fiables et peuvent fonctionner à des températures élevées, ce qui les rendent idéaux pour des applications de récupération de la chaleur inutilisée.

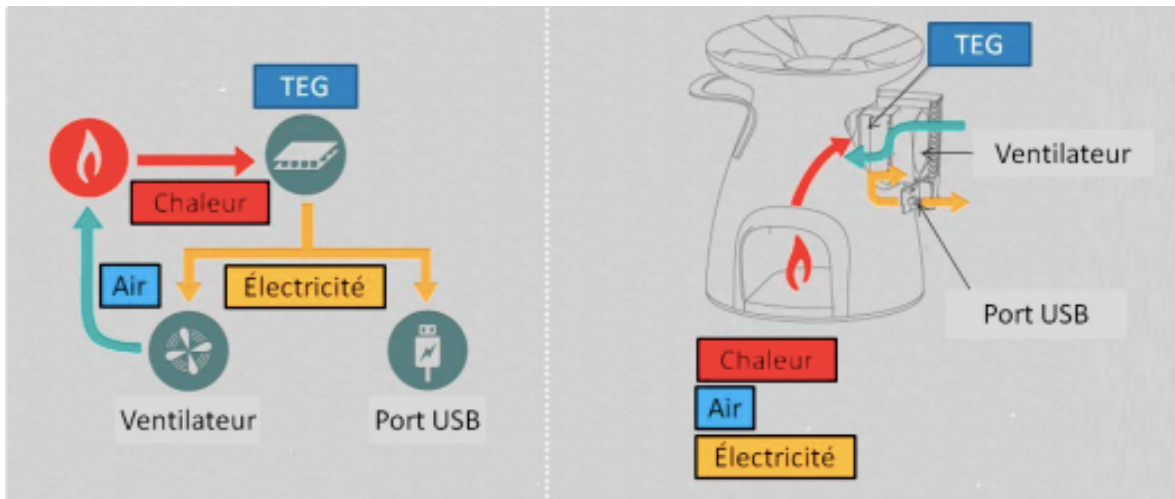
D'autre part, les modules TE sont connus pour leur faible efficacité (inférieure à 10 %), ce qui explique qu'ils sont destinés à des applications de faible énergie et ne sont pas capables de concurrencer les applications de génération de puissance à grande échelle.

L'application la plus importante de la thermoélectricité est celle de l'industrie spatiale. C'est grâce à la longue durée de vie des modules qu'il fut possible d'envoyer des sondes spatiales pour survoler les planètes, comme les sondes Voyager qui furent envoyées à l'espace en 1977 et qui sont fonctionnelles jusqu'à aujourd'hui.

Par ailleurs, la compagnie Biolite a lancé la commercialisation d'un produit basé sur les modules TE en 2011 [22]. Ce produit consiste en un réchaud à bois qui permet de recharger des appareils électroniques par port USB (figure 2-8). La source chaude est la chaleur du feu, et la source froide est le ventilateur comme l'illustre la figure 2-9.



Figure 2-8 : Biolite Campstove [22]



CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE

Beaucoup de recherches ont été menées pour caractériser et optimiser les propriétés TE des matériaux constituant les modules TE [12, 24]. Cependant, peu de recherches ont été faites sur la caractérisation de ces modules, qui est d'une grande importance puisqu'elle nous permet d'évaluer la performance de ces dispositifs pour les applications de génération d'électricité, optimiser le design des modules existant sur le marché et surtout valider les systèmes qui assurent la caractérisation de ces modules.

Il existe alors, dans le domaine de la thermoélectricité, deux catégories de tests possibles : des tests pour étudier les propriétés TE des matériaux, comme par exemple, le test d'Harman, et des tests pour caractériser les modules TE. Ce chapitre constitue une revue de littérature sur les approches menées pour la caractérisation de ces modules; il décrit les différents systèmes de mesure utilisés.

3.1 Caractérisation d'un module thermoélectrique

3.1.1 Basse différence de température

Dans cette section, nous allons présenter les travaux de caractérisation des modules sur lesquels on impose une basse différence de température (inférieure à 250°C) entre leurs surfaces supérieures et inférieures comme le montre la figure 3-1.

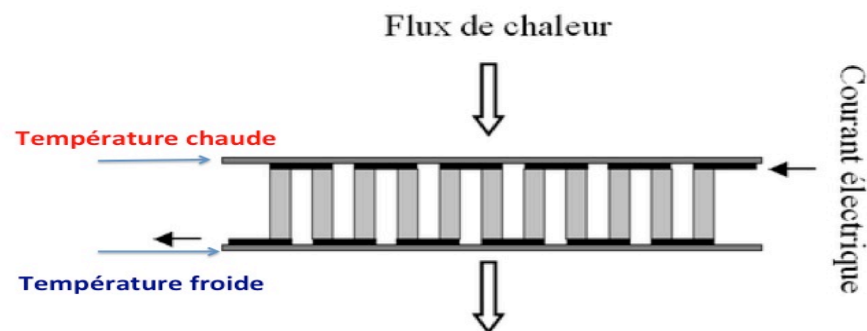


Figure 3-1: Schéma montrant la différence de température imposée sur un module TE

Faraji et al [25] ont présenté un système de mesure des modules thermoélectriques (figure 3-2) qui leur permet de déterminer les différents paramètres tels que: la résistance électrique interne du module, sa puissance électrique générée, ainsi que son efficacité de conversion (voir, respectivement, les équations 2.23, 2.12 et 2.14).

L'idée est de produire un flux de chaleur à travers le MTE en imposant une différence de température. Par la suite, c'est possible de mesurer et contrôler les paramètres électriques et thermiques. En effet, quand l'état stationnaire est atteint, la chaleur circule du bloc chaud vers le bloc froid à travers le module, la différence de température est directement mesurée à l'aide des thermocouples de type T (thermocouple formé par la paire métallique : cuivre/cuivre nickel) et K (thermocouple formé par la paire métallique : nickel chrome/nickel aluminium) insérés dans des trous qui se trouvent directement au-dessous des surfaces chaudes et froides.

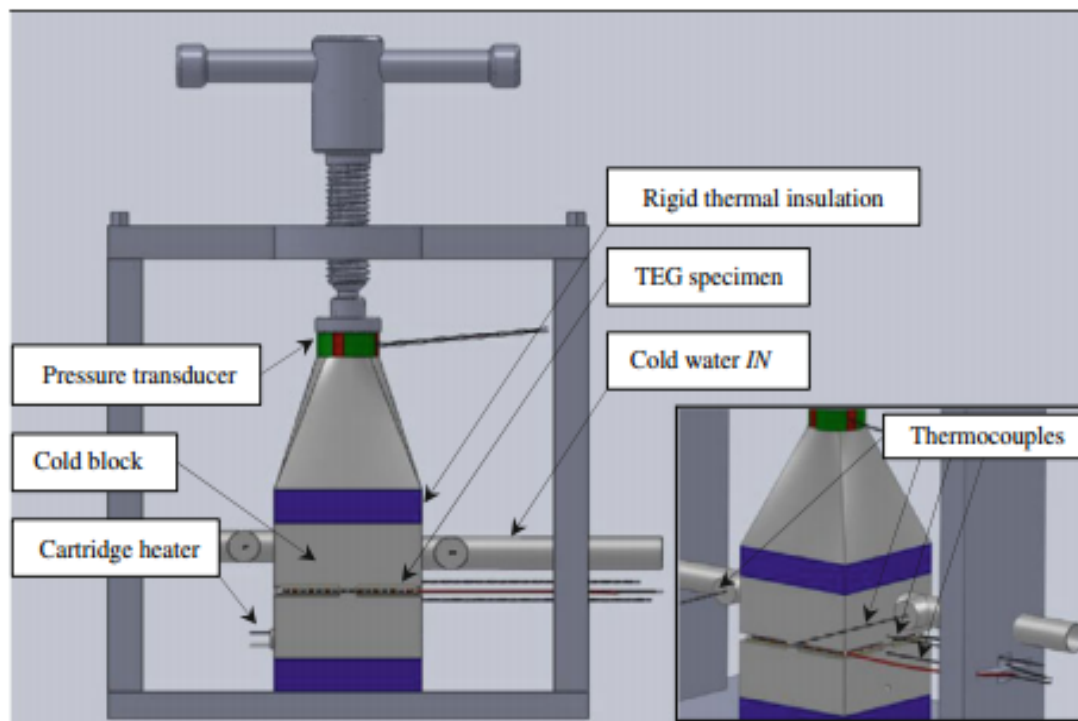


Figure 3-2: Dispositif de mesure utilisé par l'équipe de Faraji, capable de mesurer un seul MTE à la fois [25]

Les auteurs ont mené différents tests pour évaluer la performance de ce nouveau système. Ils ont placé le module TE entre le bloc chaud et le bloc froid du dispositif de mesure en ayant collé de la pâte thermique sur les deux surfaces du module. La pression étant réglée à 500 kPa, T_h fixée à 150°C et T_c à 50°C, l'état stationnaire est maintenu une heure après. Notons que le module utilisé dans cette étude est de dimensions 40×40 mm² et provient de la compagnie Tellurex. Cependant, il n'y a aucune information concernant la longueur des pattes de ce module.

Par ailleurs, les auteurs ont étudié l'effet de la force de serrage (pression) sur les modules. Ils ont varié la valeur de la pression, pour une différence de température fixe, de 0 kPa à 700 kPa et ont noté la valeur de la puissance maximale pour chaque essai. Les résultats obtenus ont montré que la puissance maximale générée augmente avec la pression jusqu'à atteindre un plateau à partir de 500 kPa.

De plus, ils ont réussi à déterminer la valeur de la résistance électrique interne R du module à partir de la courbe de la tension en fonction de la résistance de charge. R valait 4.7Ω à $T_h = 150^\circ\text{C}$ pour le module étudié.

Enfin, ils ont fait une comparaison avec les données du fabricant en montrant la courbe de la figure 3-3 qui décrit les résultats du fabricant avec ceux obtenus expérimentalement. Les auteurs ont alors affirmé que leurs résultats se sont montrés en bon accord avec ceux du fabricant en se basant sur les graphiques et sans donner les valeurs exactes fournies par la fiche technique, par exemple la valeur de R n'a pas été révélée.

Les auteurs affirment que la valeur des incertitudes totales calculées dans les résultats est évaluée à 7% sans indiquer la source de ces incertitudes. Par ailleurs, ils n'ont pas évalué la précision de leur système de mesure étant donné que la valeur de l'efficacité n'a pas été fournie par le fabricant des modules qu'ils caractérisent.

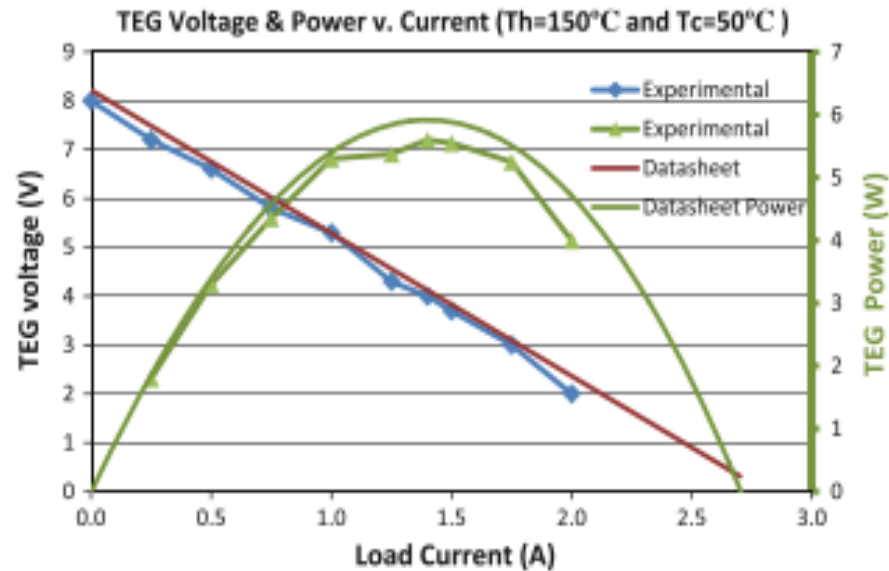


Figure 3-3: Comparaison entre la puissance et la tension mesurée d'un MTE présentée par l'équipe de Faraji avec les données de la fiche technique [25]

Un autre dispositif de mesure a été conçu par Sandoz-Rosado et Stevens [21]. Puis, il fut utilisé pour la caractérisation des modules TE commercialisés à plusieurs différences de température.

La figure 3-4 représente le schéma de ce dispositif de mesure. On remarque, à première vue, qu'il ressemble au dispositif proposé par Faraji (figure 3-2) étant donné qu'il présente presque les mêmes parties constitutives : bloc chaud, bloc froid, emplacement pour le module TE, manivelle de pression. Cependant, dans ce système de mesure (qui peut recevoir un module de dimensions allant jusqu'à $14 \times 15 \text{ cm}^2$), le bloc chaud est placé dans la partie supérieure, contrairement au système de Faraji (qui peut recevoir des modules de dimensions $40 \times 40 \text{ mm}^2$) où c'est le bloc froid qui est placé dans la partie supérieure du dispositif. L'autre différence entre les deux appareils de mesure réside dans la valeur de la température maximale que peut atteindre le bloc chaud : en effet $T_{\text{Max}} = 500^\circ\text{C}$ pour le dispositif de Sandoz Rosado et 380°C pour le dispositif de Faraji. Enfin, il existe une différence dans les matériaux constituant le bloc chaud : on cite l'aluminium pour l'appareil de la figure 3-2 et le cuivre pour l'appareil de la figure 3-4.

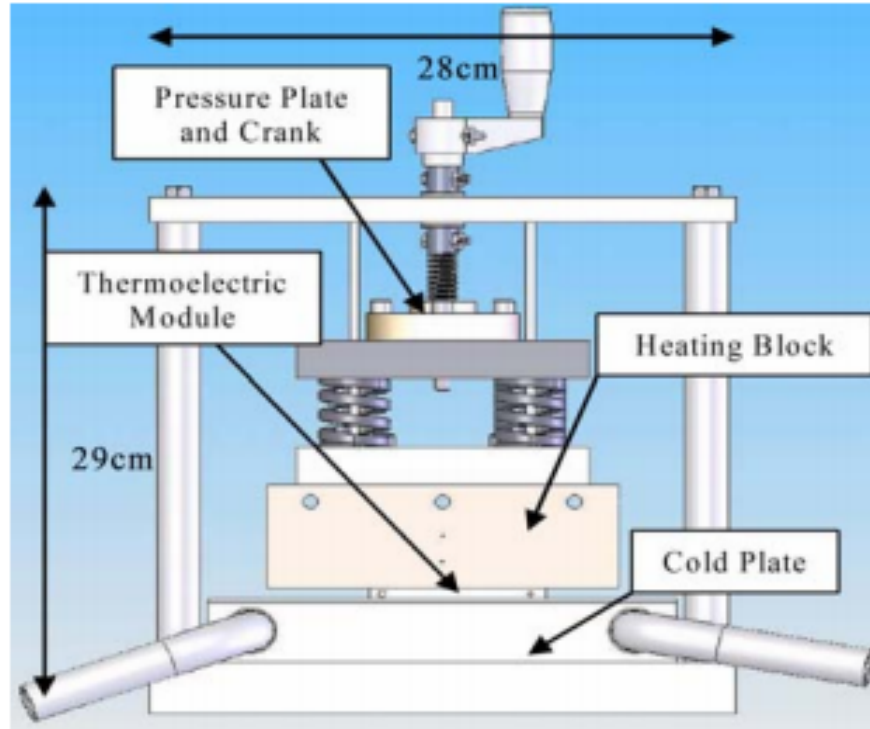


Figure 3-4: Système de caractérisation d'un seul MTE utilisé par l'équipe de Sandoz-Rosado [21]

En outre, on trouve une brève étude de l'effet de la pression dans ce travail. En effet, une série de tests a été menée sur un module TE à différentes pressions de chargement : 345 kPa, 690 kPa et 1035 kPa. Il a été remarqué alors qu'il existe une légère augmentation des valeurs de la puissance lorsque la pression augmente. Contrairement à l'étude menée par l'équipe précédente, les auteurs n'ont pas mentionné s'il existe un plateau ou une valeur limite de la pression pour laquelle la puissance reste inchangée. Le reste des expériences étaient effectuées pour une pression de 690 kPa.

D'autre part, les auteurs ont montré l'effet de la résistance thermique de la céramique sur la performance des modules. En effet, la résistance thermique Θ exprime la résistance d'un élément au passage d'un flux thermique, elle est exprimée comme :

$$\Theta = \frac{(T_1 - T_2)}{Q} \quad (\text{équation 3.1})$$

Où : $T_1 - T_2$: la différence de température entre deux milieux (en K)

Q : le flux de chaleur (en W)

On remarque que plus la résistance thermique est grande, plus le flux de chaleur traversant le corps est faible.

Les auteurs ont comparé les résultats expérimentaux d'un module disponible auprès de la compagnie Melcor (longueur des pattes=1.22 mm) avec des modèles théoriques dont un modèle standard (un modèle analytique simple qui ne prend pas en compte dans le calcul la résistance thermique de la céramique ainsi que les fuites de chaleur) et un autre modèle « interface/perte » (modèle qui prend en compte la résistance thermique de la céramique et les fuites de chaleur). Il s'est avéré alors que la résistance thermique de la céramique diminue significativement la puissance générée par le module par rapport à la puissance prédite. Par exemple, pour $T_H = 200^\circ\text{C}$ et $T_C = 34^\circ\text{C}$, la puissance maximale prédite par le modèle standard est égale à 7.3W. Par contre, celle prédite par le modèle « interface/perte » était évaluée à 6W, une différence de 18% entre les deux modèles. La résistance thermique de la céramique a diminué la différence de température à travers les jonctions de 10%.

D'après les auteurs, les résultats expérimentaux de la puissance maximale provenant du module « Melcor » étaient en bon accord avec les données du modèle « interface/perte » qui prend en compte la résistance thermique. Cependant, aucune quantification n'a été montrée.

Dans cette étude, il n'a pas été possible de valider les modèles étudiés en raison des incertitudes des paramètres fournis par le fabricant. Toutefois, les auteurs n'ont pas évalué les incertitudes de l'étude expérimentale effectuée et ils n'ont même pas présenté la précision des instruments utilisés.

Par ailleurs, Montecucco et son équipe [26] ont développé un système de mesure pour caractériser des modules TE. Ils se sont intéressés à la présentation des résultats de deux modules appartenant à un seul modèle, provenant de la compagnie Etdyn et ayant pour dimensions $40 \times 40 \text{ mm}^2$. Les expériences ont été réalisées pour quatre différences de température (50°C , 100°C , 150°C , 200°C) et pour deux différentes valeurs de la pression (0.612 MPa et 1.225 MPa). Les auteurs ont donc remarqué qu'il existe une différence entre la performance TE des deux modules (Courbes de la tension et la puissance en fonction du courant). Cet écart augmente à basse pression et diminue à haute température. La différence entre les deux valeurs de la puissance maximale dans les mêmes conditions est évaluée à 7%. Les auteurs expliquent cette

différence par la façon dont les modules sont montés dans le dispositif de mesure sans donner plus de détails.

Les auteurs soulèvent dans cette étude la question de la précision des systèmes de mesure. Ils affirment que, jusqu'à nos jours, il n'existe pas de système standard pour tester les MTE et que la performance obtenue par le système est toujours meilleure ou pire que celle fournie par la fiche technique.

D'autre part, Han et al [27] présentent certaines constatations obtenues à partir des différentes mesures effectuées sur des modules TE. Ces mesures ont été réalisées par un système expérimental qu'on peut voir sur la figure 3-5. Contrairement aux autres dispositifs présentés précédemment, ce système de mesure est muni d'un bloc chaud et un bloc froid en aluminium. La température du bloc froid est contrôlée par un module TE additionnel (module de refroidissement TEC) ainsi qu'un ventilateur. On remarque que ce travail ne présente pas une étude du contrôle de la pression étant donné que le système de mesure ne contient pas de cellule de charge permettant d'évaluer la force de serrage appliquée sur les modules.

Les auteurs ont effectué des tests sur des modules TE de dimensions $40 \times 40 \text{ mm}^2$ provenant de la compagnie Huimao, à des différences de température de 20, 30 et 40K pour des T_H de, respectivement, 343, 358 et 373K.

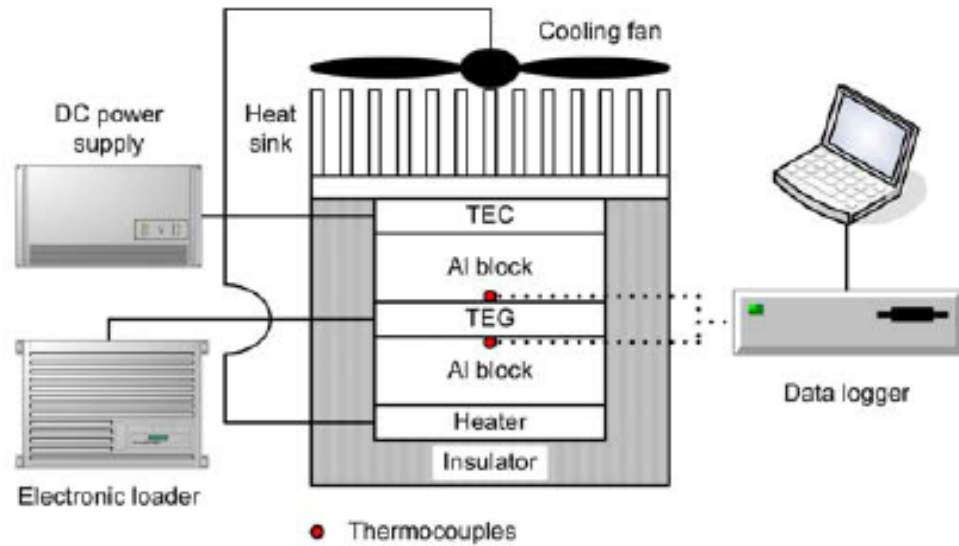


Figure 3-5: Diagramme schématique du dispositif de mesure d'un MTE utilisé par Han et son équipe [27]

En effet, les auteurs démontrent que la performance globale du module TE est améliorée quand la différence de température entre les blocs chaud et froid augmente, et ils expliquent cela par l'augmentation du transfert de chaleur. Par exemple, pour un module de longueur de patte $l = 1.22$ mm, on note $P_{Max} = 0.12$ W pour $\Delta T = 20$ K et passe à $P_{Max} = 0.48$ W pour $\Delta T = 40$ K (équation 2.27).

En outre, ils affirment que quand la longueur des pattes du module diminue (les longueurs de pattes considérés dans cette étude sont : 3, 2.2, 1.6, 1.5 et 1.2 mm), alors il y a augmentation des valeurs du courant ainsi que la puissance maximale générée par le MTE. Les équations 2.26 et 2.27 montrent la dépendance de ces paramètres avec la longueur des pattes du MTE.

Les résultats expérimentaux obtenus (les caractéristiques tension-résistance de charge et courant-résistance de charge) confirment les données théoriques prédites par un modèle analytique pour $T_H = 358$ K et $\Delta T = 40$ K. Toutefois, les auteurs notent une marge d'erreur de 1.5% dans la valeur de la résistance interne R entre les deux modèles.

Dans cette étude, les auteurs n'ont pas estimé les incertitudes sur les mesures effectuées ni les sources d'erreur qui peuvent affecter ces mesures.

3.1.2 Haute différence de température

Les études introduites précédemment présentent des caractérisations de modules sur lesquels on impose une basse différence de température ($\Delta T < 250^\circ\text{C}$). Toutefois, il est plus difficile d'évaluer le flux de chaleur à haute température (une différence de température supérieure à 250°C). Ceci peut impliquer encore plus d'erreurs dans les mesures puisque les effets de la radiation, provenant des composantes voisines au module, augmentent. Ces effets de radiation se manifestent par la chaleur générée par ces composantes qui se transfère et se propage dans l'air.

Takazawa et son équipe ont proposé un système pour caractériser les modules TE opérant à une différence de température de 550°C [28]. Le but de cette étude était limité à l'évaluation de la quantité de chaleur traversant le module ainsi que la puissance électrique générée.

La figure 3-6 montre les détails du système de mesure proposé par Takazawa. Il est important de noter que dans ce système, les mesures sont faites sous vide ($< 10^{-3}$ Pa). Dans ces conditions, le module atteint sa performance la plus élevée étant donnée la conductance thermique réduite de l'environnement. En effet, la conductivité thermique de l'air sera réduite aux alentours de 10^{-1} Pa, et les pertes de chaleur par conduction dans l'air sont négligeables au dessous de 10^{-2} Pa.

Ce dispositif de mesure contient une feuille de protection contre les radiations placée autour du bloc chaud et du module, cette protection sert à prévenir le chauffage de la chambre du vide ainsi que le support de la colonne. En effet, le chauffage de ces composantes peut générer une chaleur additionnelle au bloc froid en cuivre par radiation : ces radiations provenant des composantes chauffées engendrent l'entrée du flux de chaleur, qui n'est pas passé à travers le module, au bloc froid en Cu, et ainsi accumuler des erreurs dans les valeurs du flux de chaleur. Cette quantité de chaleur additionnelle peut sous-estimer l'efficacité du module et empêcher la détermination précise de cette grandeur (équation 2.14).

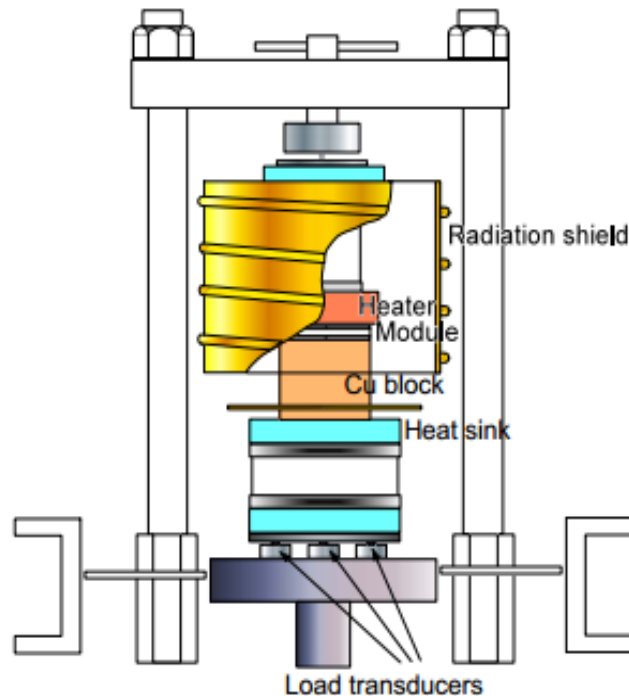


Figure 3-6: Système de mesure d'un MTE proposé par Takazawa [28]

Pour pouvoir valider les mesures du flux de chaleur, les auteurs ont mesuré cette quantité à travers un verre en quartz possédant des dimensions similaires à celle du module, puis ils l'ont comparé avec la quantité de chaleur estimée à partir de la conductivité thermique du verre de quartz. Une différence entre les deux quantités a été observée à haute température, due aux effets de radiation qui génèrent un flux de chaleur additionnel au bloc froid. Cette différence a été évaluée à moins de 5%, et fut tolérée par les auteurs.

On remarque que dans cette étude, il n'y a pas eu d'évaluation de modules TE. De plus, il y a absence de quantification des grandeurs étudiées à savoir la puissance électrique générée et le flux de chaleur. Les incertitudes sur l'évaluation du flux de chaleur n'ont pas été révélées aussi.

Anatychuk et Havrylyuk [29] ont présenté un équipement (figure 3-7) pour mesurer les paramètres des modules thermoélectriques générateurs dans la plage de température de 30°C à 600°C. La plus haute différence de température utilisée dans leur test est évaluée à 270°C. Cet équipement de mesure peut contenir un seul module TE de dimensions allant de 10×10 mm² jusqu'à 100×100 mm², placé entre le bloc chaud et le compteur de chaleur.

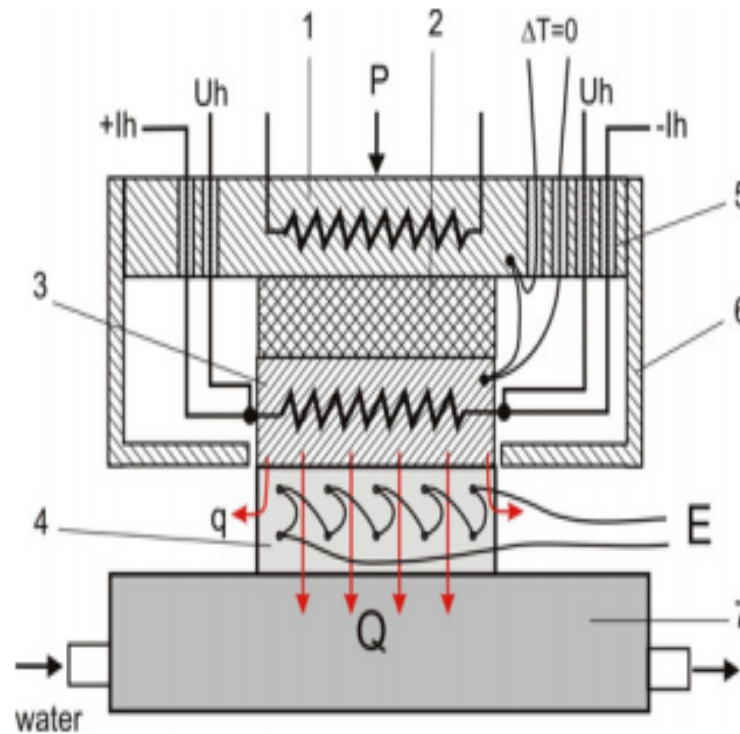


Figure 3-7: Système de mesure d'un MTE présenté par A&H [29]: 1-protection de l'appareil chauffant; 2-isolation thermique; 3-bloc chaud; 4-compteur de chaleur; 5-serrures thermiques; 6-écran de protection; 7-dissipateur de chaleur; E-signal du compteur de chaleur

L'efficacité thermoélectrique des modules a été déterminée par ce système en faisant une mesure directe du flux de chaleur. Le test consiste à utiliser un compteur de chaleur «heat meter» attaché au bloc froid capable de mesurer le flux de chaleur s'écoulant du module. Le compteur de chaleur est situé juste au dessous de la surface froide du module TE. À cet endroit, les pertes de chaleur sont minimisées et il n'est pas nécessaire d'utiliser une protection contre la chaleur comme celle localisée au niveau du bloc chaud du dispositif de mesure (élément 6 de la figure 3-7). La précision donnée par ce compteur de chaleur est de 0.1W.

Une série de tests a été menée sur un module générateur nommé Altec-1060 à $T_C = 30^\circ\text{C}$ et $T_H = 300^\circ\text{C}$, le flux de chaleur traversant le module était estimé à 140W et la puissance électrique générée valait 9W. Dans ce cas, l'efficacité expérimentale de ce module est de 6.42 %. Malheureusement, il n'est pas possible de comparer l'efficacité mesurée avec l'efficacité prédite selon les caractéristiques du module, étant donné qu'il nous manque la valeur de la figure de mérite ZT . En effet, l'efficacité TE d'un module est le produit de deux composantes : l'efficacité de Carnot et l'efficacité du matériau.

$$\eta = \eta_{Carnot} \times \eta_{Matériau} \quad (\text{équation 3.2})$$

L'efficacité de Carnot est l'efficacité théorique maximale pouvant être atteinte entre T_C et T_H :

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (\text{équation 3.3})$$

Où, T_C et T_H sont, respectivement, la température de la surface froide du module et la température de la surface chaude.

Dans le cas présent, $\eta_{Carnot} = 47.12\%$.

L'efficacité relative au matériau TE constituant le MTE s'exprime comme :

$$\eta_{Matériau} = \frac{\sqrt{1 + ZT_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT_m} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (\text{équation 3.4})$$

$$\text{Où } T_m = \frac{T_H + T_C}{2}$$

Il aurait été possible de comparer l'efficacité expérimentale avec l'efficacité théorique prédite si les valeurs de ZT étaient disponibles. Toutefois, nous avons calculé la valeur de Z à partir de la valeur de l'efficacité mesurée ($\eta = 6.42\%$), nous trouvons $Z=0.002$, ce qui est une valeur raisonnable.

Ce système de mesure permet la caractérisation des modules TE avec des erreurs inférieures à 3%. La source de ces erreurs provient du contrôleur de température donnant des valeurs avec une précision de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ et de l'unité d'enregistrement des données (tension, courant, signal du compteur de chaleur) d'une précision de $\pm 2 \times 10^{-6}\text{V}$.

3.2 Caractérisation de plusieurs modules thermoélectriques

3.2.1 Caractérisation simultanée

Les études présentées précédemment proposent la caractérisation d'un seul module TE par différents systèmes de mesure basés tous sur le même principe de mesure et qui diffèrent dans

leurs architectures ou dimensions. Cependant, il est possible d'évaluer la réponse thermoélectrique de deux modules TE simultanément. Tel est le cas de l'étude menée par Vazquez et son équipe [30]. Le système de mesure utilisé dans cette étude contient presque les mêmes composantes que les systèmes introduits dans les études précédentes : bloc chaud, dissipateur de chaleur et unité d'isolation thermique. Son avantage, c'est qu'il est capable de mesurer deux modules (de dimensions $62 \times 62 \text{ mm}^2$) en même temps.

Les auteurs ont effectué deux séries de tests :

- La première série consiste à étudier les caractéristiques puissance-courant et tension-courant pour différentes valeurs de ΔT . Les auteurs démontrent que les valeurs de la tension et la puissance générée deviennent plus grandes avec l'augmentation de ΔT . La tension passe de $V_{OC} = 0.75\text{V}$ pour $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ à $V_{OC} = 3.25\text{V}$ pour $\Delta T = 200^\circ\text{C}$.
- La deuxième série a pour but d'étudier les caractéristiques de la puissance maximale et la tension maximale en fonction de la différence de température ΔT , obtenues à partir des résultats de la première série.

La puissance électrique maximale valait 12.26W pour le module 1 et 12.06W pour le module 2 pour une différence de température de 200°C . Ces résultats étaient compatibles avec ceux du fabricant : en effet, le module 1 est capable de produire une puissance de 13W et une efficacité de 4.5% pour une différence de température de 200°C . La différence dans les valeurs de l'efficacité était attribuée aux pertes thermiques par rayonnement qui s'ajoutent à la quantité de chaleur qui traverse le module.

3.2.2 Caractérisation d'un assemblage de modules

Une étude récente de Chen et al [31] a été faite sur la caractérisation des MTE par un système qu'on peut voir sur la figure 3-8. Ce système est capable de mesurer un seul module ou encore un assemblage allant de deux jusqu'à quatre modules en série électriquement. En effet, ce dispositif comprend : un appareil de chauffage fonctionnant dans une plage de température de $110\text{-}150^\circ\text{C}$, un dissipateur de chaleur, quatre cellules de charge, et des plaques en aluminium placées de part et d'autre du module. Chaque MTE est placé entre l'unité de chauffage « *heater* » et le dissipateur de chaleur « *heat sink* ».

Dans cette étude, les auteurs ont utilisé quatre modules TE ayant pour dimensions $40 \times 40 \text{ mm}^2$, de longueur de patte 3.3 mm et un module générateur (GTE) de dimensions $44 \times 40 \text{ mm}^2$, de longueur de patte 3.6 mm, provenant de l'industrie Marlow.

Tout d'abord, les auteurs ont mesuré la tension et la puissance en fonction du courant ainsi que la tension en circuit ouvert V_{OC} en fonction de la différence de température pour les cinq modules cités. Par la suite, ils ont fait une comparaison entre le GTE et le MTE soumis à une différence de température de 95°C . Les courbes de V_{OC} , de la tension de sortie ainsi que la puissance générée ont été tracées, et il paraissait clair que les valeurs obtenues pour le MTE étaient légèrement plus grandes et ainsi meilleures que celles du GTE sous les mêmes conditions de mesure.

En outre, les auteurs ont étudié brièvement l'assemblage des quatre MTE, nominalement identiques, connectés thermiquement en parallèle et électriquement en série pour $T_H = 150^\circ\text{C}$. Il a été démontré que la puissance maximale totale est linéairement proportionnelle au nombre de modules en série et que plus on ajoute des modules, plus on obtient une puissance électrique maximale plus grande. Par exemple, pour un seul MTE : $V_{OC} = 5\text{V}$ et $P_{Max} = 1.8\text{W}$, pour les quatre MTE en série : $V_{OC} = 19.48\text{V}$ et $P_{Max} = 7.34\text{W}$.

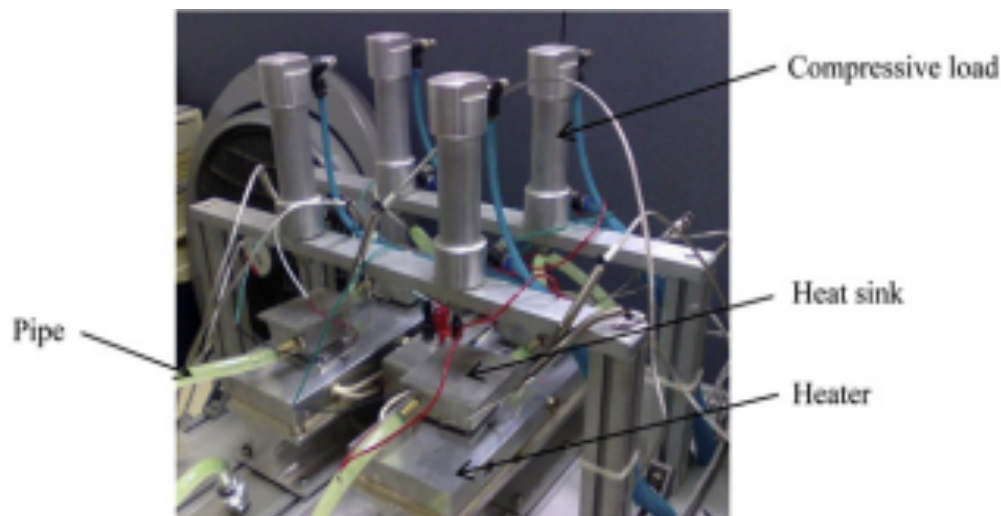


Figure 3-8: Dispositif de mesure de quatre MTE en série, proposé par Chen et son équipe [31]

Dans ce travail, les auteurs ont effectué une étude de la qualité expérimentale : ils ont fait une quantification des incertitudes relatives à tous les paramètres mesurés et ils ont conclu que les

incertitudes de mesure étaient inférieurs à 6%. Ils ont affirmé, par conséquent, que leurs expériences étaient fiables sans donner plus de détails. Par ailleurs, ils ont présenté une liste des sources d'erreur pouvant affecter les mesures ainsi que les incertitudes relatives à ces équipements. Par exemple : l'incertitude relative sur les valeurs obtenues par le système de chauffage est de 0.1%, celle provenant du débitmètre est de 1.3%, celle de la tension mesurée par le régulateur électronique de charge est de 0.1% et enfin l'incertitude relative du courant mesurée par le régulateur électronique est de 2.5%.

En conclusion, nous allons énumérer les points bien établis dans la littérature. La majorité des dispositifs de caractérisation des modules TE présents dans la littérature sont basés sur le même principe de mesure de génération d'électricité. Toutefois, ils diffèrent par leurs architectures, dimensions ou encore la disposition des blocs chaud et froid par rapport à l'emplacement du module. De plus, on peut conclure que la plupart des travaux présentés ont étudié les caractéristiques de sortie (tension, puissance) des modules mesurés ainsi que l'effet de la pression sur la performance de ces modules. On retrouve aussi, dans la plupart des études présentées, une comparaison des résultats obtenus avec les données du fabricant.

Cependant, peu de travaux ont évalué le flux de chaleur et l'efficacité des modules en changeant les conditions de mesure (différence de température, longueur des pattes du MTE). Dans la plupart des travaux présentés, on ne touche pas à une question importante dans un travail expérimental qui est la quantification de l'exactitude des mesures effectuées ainsi que les sources d'erreur pouvant affecter ces mesures.

Quant à la caractérisation des modules connectés électriquement en série, il a été démontré que la puissance augmente avec l'ajout des modules. Cette constatation a été démontrée aussi par Gou et son équipe [32]. Cependant, ces derniers ont étudié un modèle théorique de l'assemblage de dix modules en série. Il est donc important d'étudier la réponse TE de cet assemblage expérimentalement.

Nous allons au cours de ce projet de maîtrise, caractériser des modules TE fabriqués à partir des matériaux TE élaborés dans le laboratoire de thermoélectricité de l'École Polytechnique de Montréal, en utilisant un système de mesure conçu dans notre laboratoire et en effectuant des tests sous différentes conditions de mesure.

En outre, nous constatons que dans la littérature, la plupart des recherches sont focalisées sur la caractérisation TE d'un seul module. Or, pour certaines applications de génération d'électricité, il est important de considérer l'assemblage de plusieurs modules en série ou en parallèle. Dans la littérature scientifique, la puissance électrique générée a été évaluée pour un assemblage de quatre MTE. Pour cela, nous proposons un deuxième système de mesure, qui est encore en phase préliminaire, et qui consiste à étudier l'assemblage de dix modules générateurs d'électricité en série ou en parallèle électriquement. Nous allons pouvoir déterminer expérimentalement la performance de plusieurs modules connectés ensemble sous différentes conditions de mesure. Ceci permettra de tester le système d'assemblage des MTE et permettra, éventuellement, de tester les modules avant de les monter dans des dispositifs industriels.

Par ailleurs, nous allons présenter les incertitudes sur les paramètres mesurés dans cette étude et nous allons quantifier la précision des équipements de mesure utilisés.

CHAPITRE 4 SYSTÈMES DE MESURE DES MODULES TE

Dans ce chapitre, nous allons présenter un système de mesure pour caractériser la performance d'un seul module TE à la fois ainsi qu'un système d'assemblage de plusieurs modules TE qui ont été conçus, tous les deux, dans le laboratoire de thermoélectricité de l'École Polytechnique de Montréal. Ces deux systèmes reposent sur le même principe de fonctionnement qui consiste à imposer une différence de température entre les deux surfaces du module (ou des modules) à caractériser.

4.1 Système de conditionnement et de mesure d'un seul module thermoélectrique

4.1.1 Description

La caractérisation expérimentale des modules TE de génération d'électricité est basée sur des essais de mesure qui consistent à imposer une différence de température entre les deux surfaces du module. Cette différence de température va permettre de générer une différence de potentiel ou un courant électrique, selon le circuit de mesure. Pour cela, le système de mesure doit contenir une source chaude et une source froide afin de produire ce gradient de température.

L'équipement de mesure capable de caractériser les modules thermoélectriques est représenté dans la figure 4-1. Il est essentiellement composé de trois parties : (a) un appareil régulateur électronique de charge DC (*electronic load*), (b) un système de conditionnement et de mesure capable de recevoir l'échantillon à caractériser, (c) un système de régulation ou de contrôle de la température des sources chaude et froide. Nous allons décrire ces parties plus en détail dans les prochains paragraphes.

Le système de conditionnement et de mesure (figure 4-2) est composé d'un bloc chaud isolé ou source chaude en acier et d'un bloc froid en aluminium. Le bloc chaud est composé d'une pièce cylindrique (de hauteur 25 mm et de diamètre 95 mm) avec une rallonge (flèche 2 de la figure 4-2) de longueur 20 mm et de section rectangulaire $40 \times 40 \text{ mm}^2$ pour être compatible avec la section du module TE à caractériser. Ce bloc contient un système de chauffage électrique utilisant des cartouches chauffantes (représentées par les trois cercles de la figure 4-2) qui

peuvent maintenir la température chaude stable et homogène jusqu'à 600°C. La puissance d'entrée provient d'un système électrique fonctionnant à 208VAC.

Quant au bloc froid, il est formé par une pièce cylindrique (de hauteur 100 mm et de diamètre 95 mm) avec une rallonge (flèche 4 de la figure 4-2) de longueur 5 mm ayant une section rectangulaire de $40 \times 40 \text{ mm}^2$ qui correspond à la section des modules à caractériser. Le bloc froid est conçu de telle façon à ce qu'il soit possible d'y faire circuler un liquide de refroidissement. Dans ce système, il s'agit d'un refroidissement à l'eau (température variant entre 4 et 19°C) où on peut commander le débit d'eau maximum de l'ordre de 8.4 l/min à l'aide d'une vanne manuelle.

Par ailleurs, le système de conditionnement et de mesure est équipé d'une manivelle de contrôle de charge mécanique (composante 1 de la figure 4-2) qui, une fois tournée, permet de serrer ou desserrer le module entre les deux blocs. Cette manivelle est responsable du contrôle de la pression appliquée sur le module qui est une étape primordiale dans le protocole expérimental pour garantir une mesure correcte.

La force de serrage appliquée peut être évaluée grâce à une cellule de charge qui provient de *Loadstar sensor* et qui est capable de supporter jusqu'à 400lb. Sa précision est de $\pm 0.25\%$. Cette cellule est située en bas du système de mesure (composante 5 de la figure 4-2) et reliée directement à l'ordinateur. En effet, la cellule de charge est capable de mesurer la force appliquée sur le dispositif.

On sait que

$$P_m = \frac{F_m}{S_m} \quad (\text{équation 4.1})$$

P_m : pression appliquée sur le module en MPa

F_m : force appliquée sur le module en N

S_m : surface du module en mm^2

Les valeurs de la force appliquée sur le module sont visualisées à l'aide du logiciel «*LoadVUE*» (annexe A) qui est fourni avec la cellule de charge. Connaissant les dimensions du module mesuré, il est alors possible de déterminer la pression appliquée sur lui en utilisant l'équation 4.1. La force de serrage maximale qu'on peut atteindre dans ce système est de 400 lb

(qui correspond à 1779.2 N). L'effet de cette pression sur la puissance générée sera traité dans le prochain chapitre.

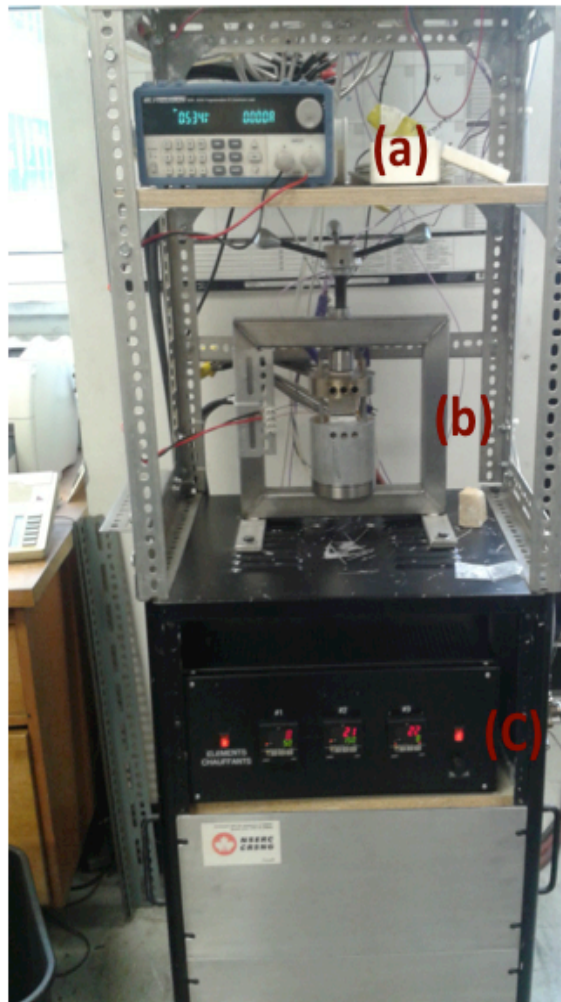


Figure 4-1: Équipement de mesure des modules TE conçu à l'ÉPM : (a) appareil régulateur électronique de charge «B&K *precision* 8500», (b) système de conditionnement et de mesure, (c) contrôleur de température

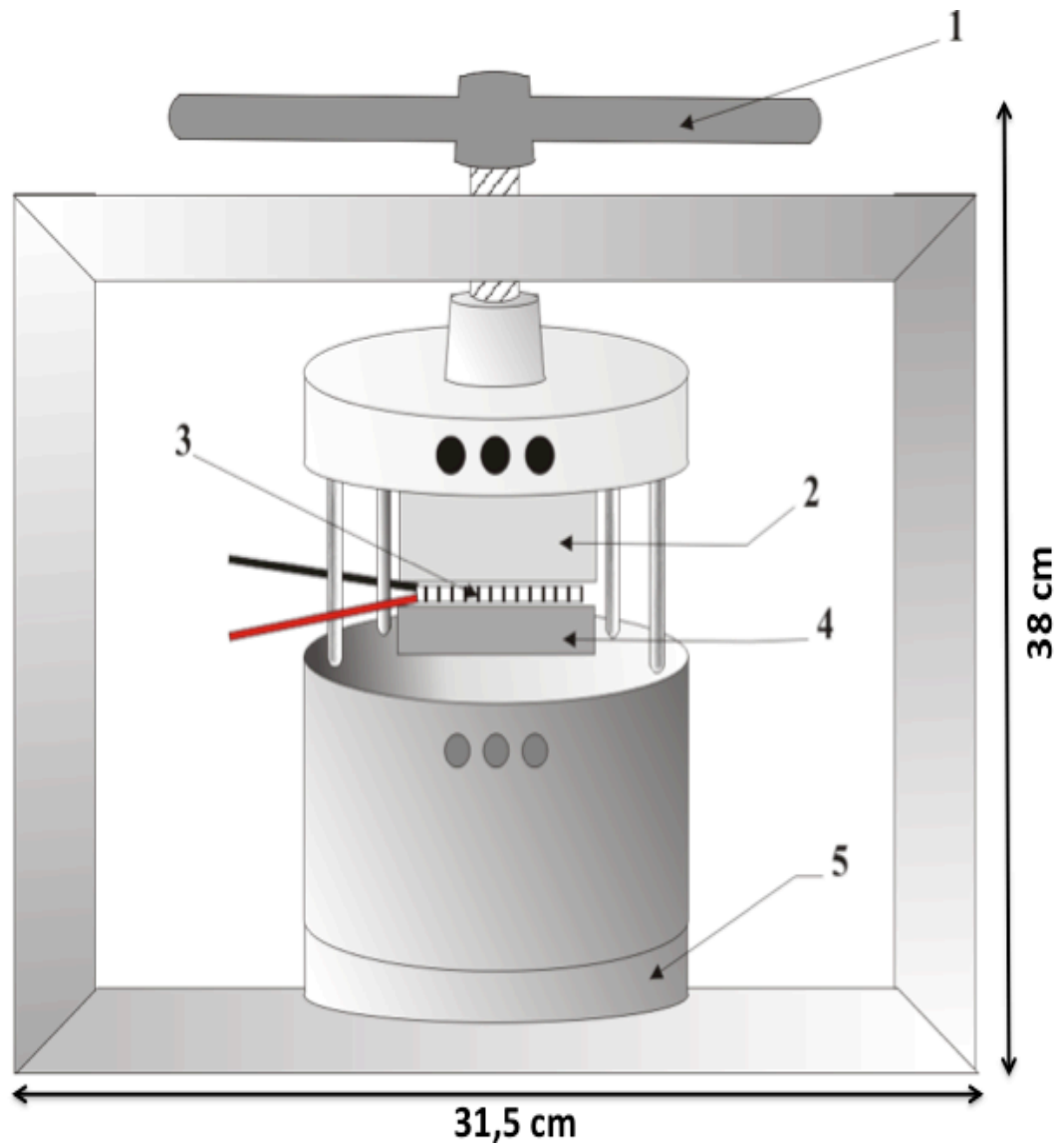


Figure 4-2: Schéma du système de conditionnement et mesure d'un seul MTE conçu à l'ÉPM : 1- Manivelle de contrôle de charge mécanique, 2- Bloc chaud, 3- Module TE, 4- Bloc froid, 5- Cellule de charge

Le bloc chaud contient deux thermocouples (T_{H1} et T_{H2} de la figure 4-3) servant à la détermination du flux de chaleur et un 3^{ième} thermocouple (T_{H3} de la figure 4-3) situé juste à la surface supérieure du MTE. Quant au côté froid, il est composé d'un thermocouple (T_{C1} de la figure 4-3) situé à la surface inférieure du MTE. Ces thermocouples, de type E, (voir caractéristiques au tableau 4-1) sont reliés d'une part au contrôleur de température et d'autre part, au boîtier « *Measurement computing USB-TC* » capable de convertir la tension en température. Ainsi, les thermocouples permettent la mesure de la température du bloc chaud, la température à la surface chaude du module et la température du bloc de refroidissement en Al.

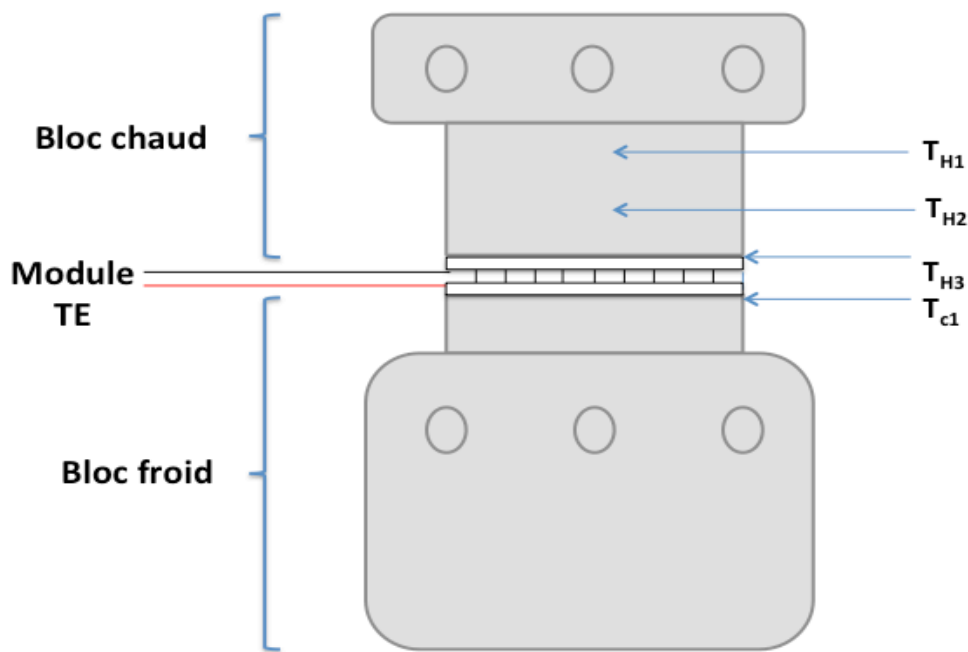


Figure 4-3: Emplacement des thermocouples dans le système de conditionnement et de mesure des MTE (T_{H1} , T_{H2} et T_{H3} pour les températures du bloc chaud, T_{C1} pour la température du bloc froid)

Tableau 4-1: Caractéristiques du thermocouple

Type	E
Fournisseur	Omega Engineering
Matériaux	alliage nickel cuivre (45%) / alliage nickel chrome (10%)
Gamme de température	0°C à 900°C avec une précision de $\pm 1.7^\circ\text{C}$

Les procédures de chauffage et de refroidissement sont sous le contrôle du régulateur ou contrôleur de température. La figure 4-4 montre une photo du système de régulation de température commercial utilisé dans ce projet. Il est constitué de trois contrôleurs PID (proportionnel, intégral, dérivé) de type E5CK qui donnent une précision de $\pm 1^\circ\text{C}$ et qui proviennent de la compagnie Omron. Ce type de contrôleur PID est compatible avec les thermocouples de type E dans une plage de température entre 0°C et 600°C. De plus, il constitue un instrument assez avancé dans la mesure qu'il établit le choix des paramètres de contrôle par un processus interne (auto-tuning). Le PID compense électroniquement la température de référence du thermocouple.

Les valeurs affichées en vert sur la figure 4-4 représentent la température commandée, tandis que les valeurs affichées en rouge correspondent à la température mesurée.

Les thermocouples des blocs chaud et froid sont connectés aux contrôleurs PID (figure 4-5). En effet, le thermocouple T_{H2} du bloc chaud est relié au contrôleur de température N°3, le thermocouple T_{H3} qui est placé à la surface supérieure du module est relié au contrôleur de température N°2. Quant au thermocouple T_{C1} situé à la surface inférieure du module du côté froid, il est relié au contrôleur de température N°1. D'autre part, ces thermocouples sont reliés à un boîtier « *Measurement computing* USB-TC » capable de les recevoir et envoyer leur signal à l'ordinateur via une connexion USB. Ce boîtier lit la tension provenant des thermocouples, puis la convertit en degré Celsius et envoie les signaux convertis à l'ordinateur pour l'acquisition et le stockage des données.

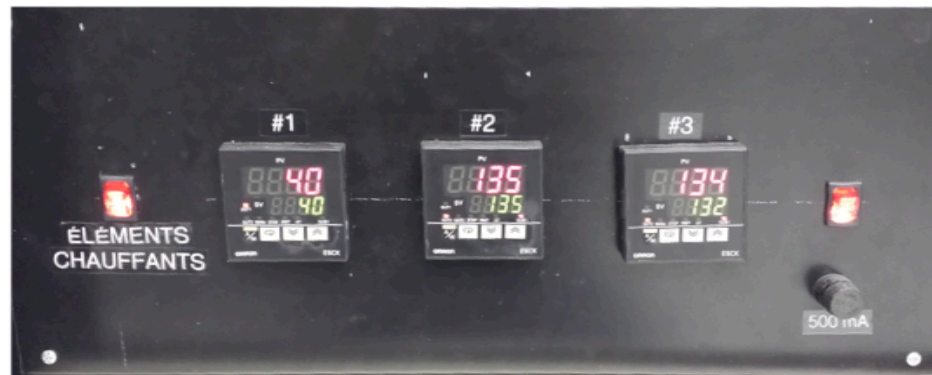


Figure 4-4: Contrôleurs de température de l'équipement de mesure

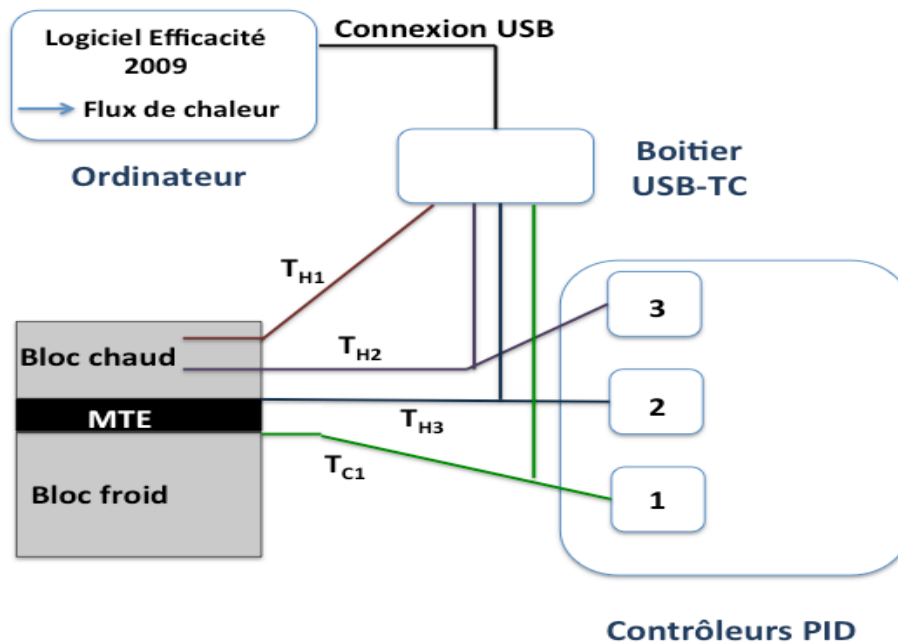


Figure 4-5: Schéma du circuit thermique reliant les TC aux contrôleurs PID et à l'ordinateur

La présence de ces thermocouples dans le système de mesure ne permet pas seulement de déterminer la température de chaque bloc, mais aussi d'évaluer le flux de chaleur Q_H qui traverse le module. Cette évaluation est obtenue à partir de la mesure de T_{H1} et T_{H2} .

En effet, on sait que :

$$Q_H = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{équation 4.2})$$

Où, λ est la conductivité thermique du matériau constituant le bloc chaud, qui est l'acier inoxydable 304. Pour ce système de mesure, la conductivité thermique de l'acier inoxydable est de $8.09 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Le terme $\Delta T/\Delta x$ représente la variation de température par unité de longueur, où ΔT correspond à la différence de température entre deux points du bloc chaud (entre les thermocouples T_{H1} et T_{H2} dans le cas présent), et Δx représente la distance entre ces deux points (distance entre les thermocouples T_{H1} et $T_{H2} = 10 \pm 0.1 \text{ mm}$).

Par ailleurs, les valeurs de la température ne sont pas précises, elles dépendent de la précision de l'instrument de mesure utilisé. Dans le cas de ce système, les incertitudes sur les valeurs de la température découlent des incertitudes relatives aux thermocouples ainsi que des incertitudes liées à la lecture de cette température par la carte de l'ordinateur qui sont évaluées à $\pm 0.05^\circ\text{C}$. Ainsi, l'incertitude sur la température s'écrit comme :

$$\delta T = \delta T_{\text{carte}} + \delta T_{TC} \quad (\text{équation 4.3})$$

Nous savons que $\delta T_{TC} = 1.7^\circ\text{C}$. Ainsi, les incertitudes absolues des mesures sur la température peuvent être évaluées à $\pm 1.75^\circ\text{C}$. Cette donnée est très importante puisqu'elle contribuera à l'incertitude de l'évaluation du flux de chaleur Q_H . L'équation 4.2 démontre que la précision sur les valeurs du flux de chaleur dépend des contributions de la conductivité thermique λ et du terme $\Delta T/\Delta x$:

$$\frac{\delta Q_H}{Q_H} = \frac{\delta \Delta T}{\Delta T} + \frac{\delta \Delta x}{\Delta x} + \frac{\delta \lambda}{\lambda} \quad (\text{équation 4.4})$$

Si nous calculons les incertitudes relatives sur le terme $\Delta T/\Delta x$ (pour le cas $\Delta T = 100^\circ\text{C}$) :

$$\frac{\delta(\Delta T / \Delta x)}{(\Delta T / \Delta x)} = \frac{\delta \Delta T}{\Delta T} + \frac{\delta \Delta x}{\Delta x} = \frac{1.75}{100} + \frac{0.1}{10} = 2.75\%$$

Les incertitudes sur le flux de chaleur sont aussi affectées par l'incertitude de l'évaluation de la conductivité thermique ($\lambda=8.09\pm0.005 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) :

$$\frac{\delta Q_H}{Q_H} = \frac{0.005}{8.09} + 0.0275 \approx 2.8\%$$

Ainsi, nous remarquons que dans l'évaluation du flux de chaleur, l'erreur la plus importante est portée principalement par la mesure de la température, et l'impact de cette erreur diminue pour les différences de température plus élevées (pour $\Delta T=140^\circ\text{C}$, l'erreur sur le flux de chaleur ne dépasse pas 2.3%).

En outre, le module thermoélectrique de dimensions $40 \times 40 \text{ mm}^2$, de même section que les blocs chaud et froid, est placé entre ces deux blocs pour assurer la continuité du flux de chaleur. Une mince feuille de graphite est souvent utilisée pour réduire la résistance thermique entre la surface du module et celle des deux blocs chaud et froid. Le graphite est connu pour sa conductivité thermique élevée (jusqu'à $500 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Le MTE est connecté à un régulateur électronique de charge DC (*electronic load*) de type «B&K precision 8500» (figure 4-6). Cet appareil fournit la résistance de charge R_L qui entraîne le passage d'un courant (mesuré à l'aide de l'ampèremètre de l'appareil) et l'apparition d'une tension qui s'établit aux bornes de la résistance (mesurée par le voltmètre de l'appareil). Après avoir atteint l'état stationnaire pour la température, le régulateur électronique de charge fait varier la résistance de charge R_L pour atteindre la valeur du courant demandé par l'utilisateur, on note alors la valeur de la tension correspondante. C'est ainsi qu'on obtient la caractéristique courant-tension.

Le tableau 4-2 regroupe l'intervalle d'opération ainsi que la précision du régulateur électronique de charge.

Tableau 4-2: Spécifications du modèle «B&K *precision* 8500» du régulateur électronique de charge

Paramètre mesuré	Intervalle d'opération	Précision
Tension	0 – 120 V	$\pm 0.05V$
Courant	0 – 30 A	$\pm 0.1A$
Puissance	0 – 100 W	$\pm 1.1W$

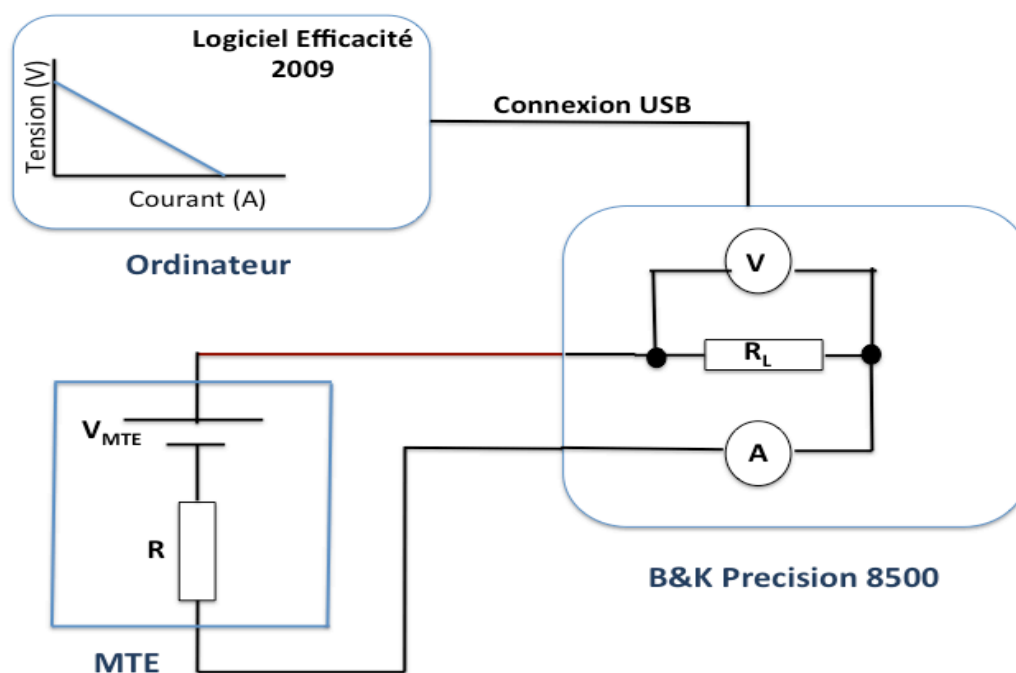


Figure 4-6: Schéma du circuit électrique équivalent formé par le MTE et le régulateur électronique de charge lors des mesures

Les données collectées des thermocouples (températures), du régulateur électronique de charge (courant/tension) et de la cellule de charge (force de serrage) sont enregistrées dans l'ordinateur qui sert d'appareil d'acquisition et d'enregistrement de données.

La figure 4-7 montre un schéma qui décrit les connexions faites entre les différents appareils constituant l'équipement de mesure des MTE. Pour faciliter la compréhension de cette figure, nous avons éliminé les connexions des thermocouples T_{H1} et T_{H2} responsables des mesures du flux de chaleur. Toutefois, ces connexions sont visibles sur la figure 4-5.

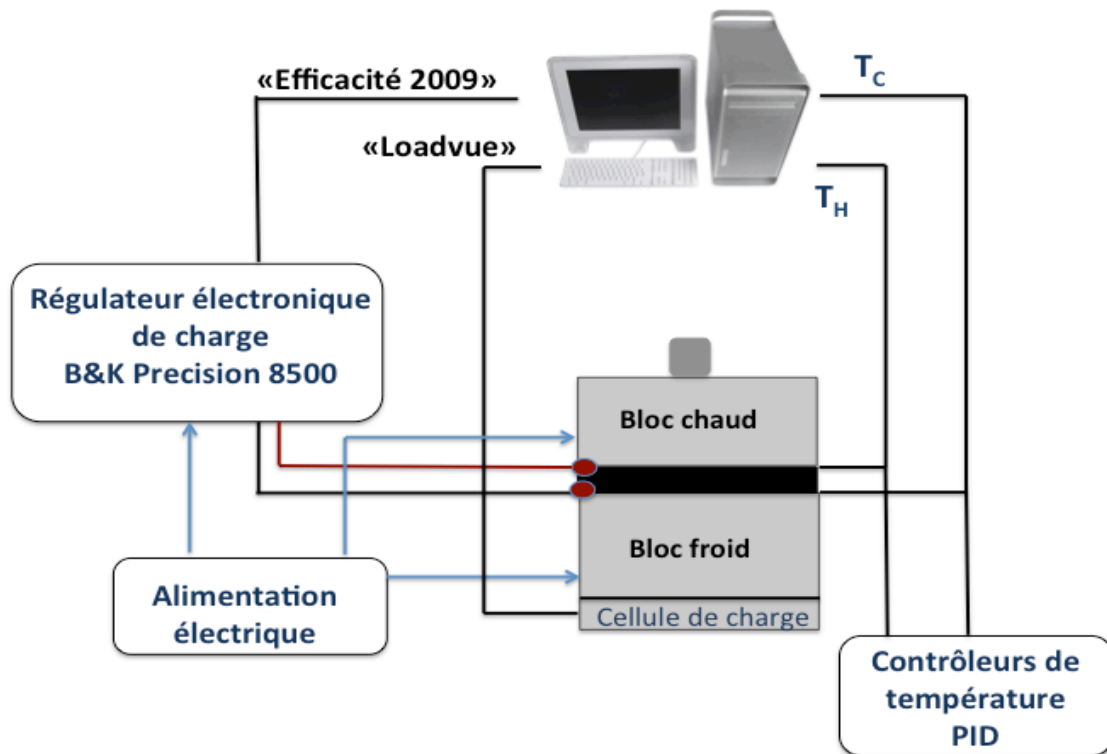


Figure 4-7: Schéma explicatif des connexions dans l'équipement de mesure des MTE

Le système de conditionnement et de mesure, la cellule de charge responsable des mesures de la pression appliquée sur le MTE, le régulateur électronique de charge ainsi que les thermocouples sont reliés à l'ordinateur. Pour visualiser les résultats expérimentaux, on utilise le logiciel «Efficacité 2009» qui a été conçu aussi à l'École Polytechnique de Montréal (annexe B).

La figure 4-8 représente une capture d'écran de ce logiciel qui nous donne la courbe courant-tension, ce qui permet d'évaluer le courant en court-circuit I_{CC} ainsi que la tension en circuit ouvert V_{OC} (ceci sera plus détaillé dans le prochain chapitre). De plus, ce logiciel nous fournit les valeurs de la puissance électrique P_{MTE} déterminée à partir des valeurs du courant et de la tension, $P_{MTE} = I \times V$, le flux de chaleur Q_H (équation 4.2) ainsi que l'efficacité η (équation 2.14) du module thermoélectrique étudié.

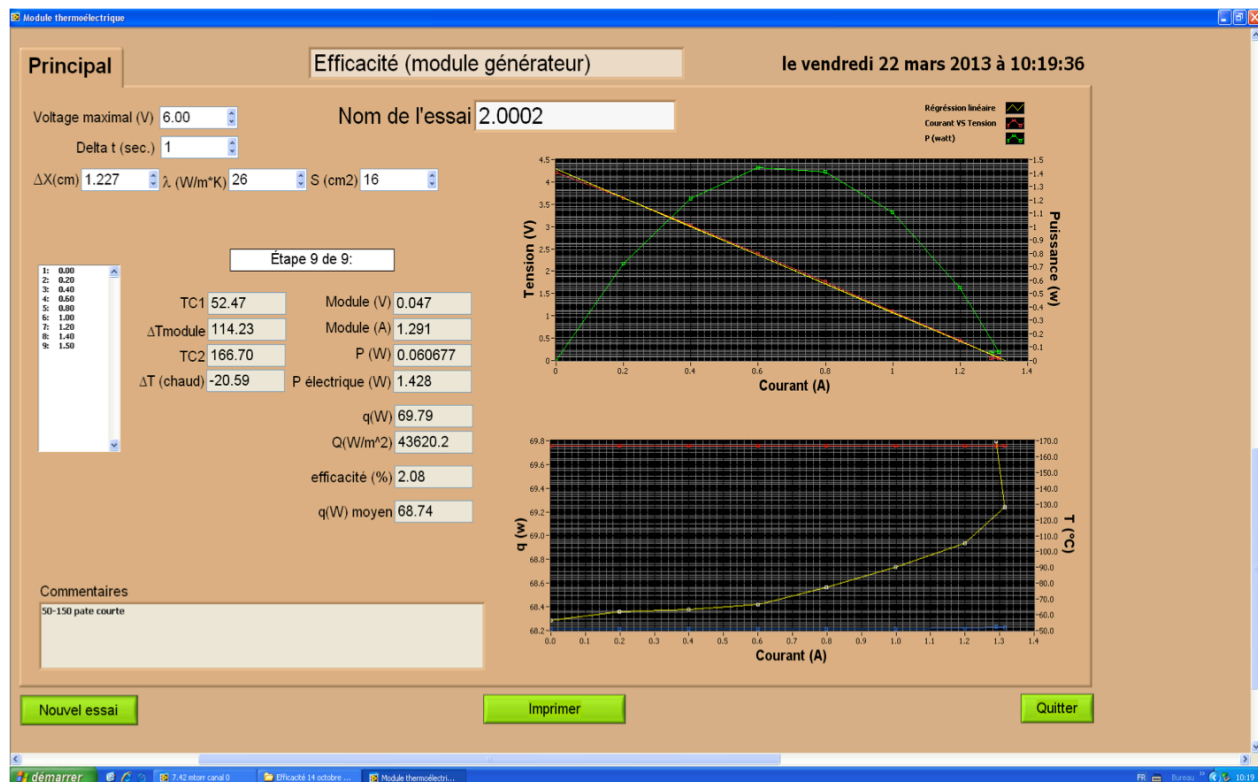


Figure 4-8: Capture d'écran du logiciel de mesure «Efficacité 2009»

4.1.2 Déroulement d'un test de mesure

Pour effectuer un test de mesure, il faut tout d'abord placer le module thermoélectrique en question entre les deux blocs chaud et froid, en ayant appliqué de la pâte thermique sur ses deux surfaces. En effet, la pâte thermique est une substance qui s'ajoute à la surface de deux objets en contact dans le but d'éviter le passage d'air entre ces deux surfaces. La pâte utilisée dans ce projet provient de la compagnie Omega «*OmegaTherm 201*», elle peut tenir jusqu'à une température de 200°C. Des feuilles de graphite sont aussi placées aux deux surfaces carrées des blocs chaud et froid.

Par la suite, on applique une force de serrage sur le module en tournant la manivelle pour assurer une certaine valeur de la pression, qui peut être évaluée grâce au logiciel «*LoadVUE*». Le module est alors compressé entre les deux blocs chaud et froid, qui vont maintenir une différence de température entre ses deux surfaces. Puis, on assure la connexion entre les fils du module (positif et négatif) et ceux du régulateur électronique de charge «*B&K precision 8500*». Une fois le module installé, on fixe les températures voulues des blocs chaud et froid sur le contrôleur de

température. Puis, on ouvre la vanne qui assure la circulation d'eau pour le refroidissement et on commence le chauffage. Après environ 15 à 20 minutes, l'état stationnaire est atteint.

Sur le logiciel de mesure «Efficacité 2009», on choisit le mode de mesure qui est «mode générateur». Puis, on fixe la tension maximale, la durée Δt de chaque étape de mesure et la valeur maximale du courant ainsi que le pas du courant, et enfin on lance l'essai.

La première valeur relevée à l'état stationnaire est celle de V_{OC} . Puis une fois que la résistance de charge R_L commence à varier suite à la commande du régulateur électronique de charge, on assiste à une perturbation de la température due à l'effet Peltier. Ceci implique l'augmentation de la puissance du dispositif de chauffage pour rétablir la température chaude voulue. Par la suite, les températures des blocs chaud et froid sont maintenues aux valeurs fixées pour tous les points de mesure. On note des variations de $\pm 2^\circ\text{C}$ sur le contrôleur de température. Cette perturbation de température sera expliquée dans le chapitre 5 à la section « conditions de mesure ».

Une fois l'état stationnaire atteint, le flux de chaleur Q_H circule du bloc chaud vers le bloc froid via le MTE. Ce flux est mesuré à l'aide des thermocouples de type E insérés dans le bloc chaud. Le flux de chaleur passe à travers le module (qui est estimé à environ 50W pour une plage de température $T_C = 20^\circ\text{C}$ et $T_H = 160^\circ\text{C}$ dans le cas d'un MTE de longueur de pattes 2 mm), une quantité de chaleur est alors capturée et convertie en puissance électrique, une quantité négligeable s'échappe sous forme de pertes parasites et le reste atteint le bloc froid. Ce dernier absorbe et envoie cette quantité de chaleur reçue au dissipateur de chaleur.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à deux plages de température : $T_C = 20^\circ\text{C}$, $T_H = 160^\circ\text{C}$ et $T_C = 50^\circ\text{C}$, $T_H = 150^\circ\text{C}$. Ceci est, d'une part, dans le but de caractériser les MTE à deux différences de températures (140°C et 100°C), et d'autre part, pour faire une comparaison avec les données du fabricant (chapitre 5) qui sont présentées pour $T_C = 50^\circ\text{C}$, $T_H = 150^\circ\text{C}$.

4.2 Système de conditionnement et de mesure d'un assemblage de modules TE

Dans la section précédente, nous avons introduit un système de conditionnement et de mesure capable de caractériser un seul module TE à la fois. Maintenant, pour caractériser simultanément plusieurs modules TE connectés électriquement, nous avons eu recours à un système d'assemblage de plusieurs MTE, qui a été conçu lui aussi à l'École Polytechnique de Montréal et qui est encore en phase expérimentale préliminaire. Ainsi, nous présentons dans cette section un équipement de mesure capable de caractériser un assemblage en série ou en parallèle (électriquement) de modules TE sur lesquels on impose les mêmes conditions d'opération (différence de température et pression de serrage). Ces modules sont thermiquement en parallèle.

4.2.1 Description

Ce système est composé de deux étages capables de recevoir chacun jusqu'à dix modules (un total de vingt modules sur les deux étages). Il est constitué ainsi de deux blocs froids, entre lesquels on trouve le bloc chaud, comme il est indiqué sur la figure 4-9. Les modules sont alors placés côte à côte entre le bloc chaud et un bloc froid en ayant mis du graphite, qui est un bon conducteur thermique, aux deux surfaces du module. La figure 4-10 montre une photo de ce système de conditionnement et de mesure.

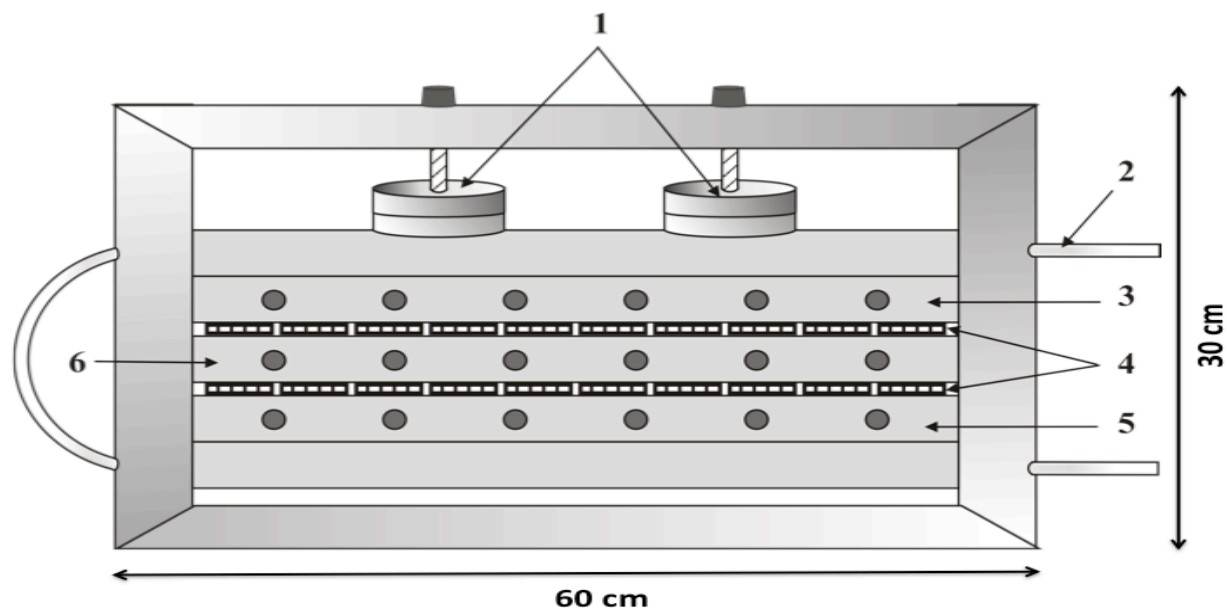


Figure 4-9: Système de conditionnement et de mesure de plusieurs MTE conçu à l'ÉPM : 1- rondelles de pression, 2- tuyaux de circulation de l'eau de refroidissement, 3- bloc froid supérieur, 4- Modules TE, 5- bloc froid inférieur, 6- bloc chaud

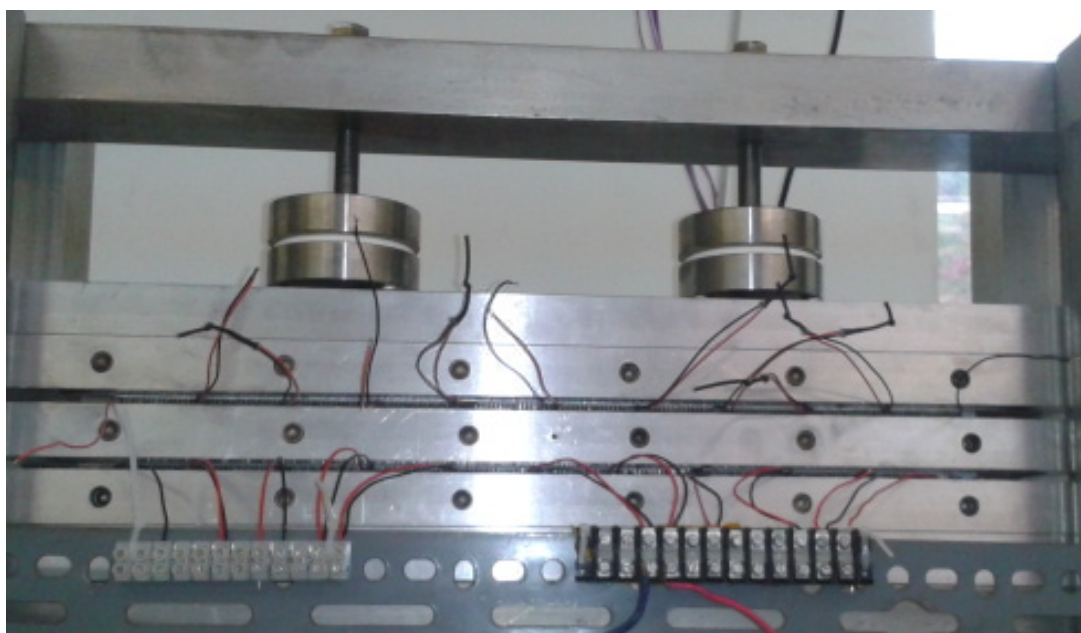


Figure 4-10 : Photo du système d'assemblage des MTE conçu à l'ÉPM

Le bloc chaud (de largeur 54 cm, épaisseur 2.5 cm et profondeur 8 cm) est en aluminium. Il est constitué de six cartouches chauffantes capables d'atteindre une température de 600°C (composante 6 de la figure 4-9).

Le bloc chaud est situé entre deux blocs froids en aluminium (chaque bloc froid a pour dimensions : largeur 54 cm, épaisseur 5 cm et profondeur 8 cm), qui sont constitués chacun par deux parties : une partie contenant six trous pour les cartouches chauffantes (composantes 3 et 5 de la figure 4-9), et une 2^{ième} partie constituée par des tuyaux capables d'y faire circuler l'eau pour le refroidissement. En effet, la circulation d'eau, qui est commandée par une vanne, circule à travers les tuyaux situés dans les deux blocs froids pour finir aux évacuations (voir composante 2 de la figure 4-9). Le débit d'eau maximum dans ce système est de 8.4 l/min (même débit que le système présenté en 4.1).

À la partie supérieure du système de conditionnement et de mesure, on trouve deux rondelles de pression (composante 1 de la figure 4-9) servant à appliquer une force de serrage sur les modules. Malheureusement, il n'était pas possible de placer une cellule de charge pour ce système par manque d'espace. Cependant, on a eu recours à une méthode de calcul mécanique qui nous a permis d'évaluer la force de serrage et par conséquent, la pression appliquée sur les modules en se basant sur la formule de l'équation 4.2. Cette méthode sera détaillée dans le chapitre suivant.

Chacun des trois blocs en aluminium constituant ce système est muni de cinq trous qui se trouvent à l'arrière du dispositif (figure 4-11), capables de recevoir des thermocouples pour évaluer la température du bloc. Ces thermocouples sont les mêmes que ceux utilisés dans le système décrit précédemment (de type E). Généralement, le thermocouple qui indique la température du bloc est placé dans le trou situé au milieu de ce dernier (position du thermocouple 3 à la figure 4-11). Nous allons voir dans le chapitre suivant l'effet du déplacement de la position de ce thermocouple sur la puissance générée. Ces thermocouples sont reliés à l'ordinateur et au contrôleur de température PID (figure 4-4) utilisé pour le premier système de conditionnement et de mesure : en effet, le thermocouple T_{C1} mesurant la température du bloc froid supérieur est relié au contrôleur de température N°1, le thermocouple T_H mesurant la température du bloc chaud est relié au contrôleur de température N°2 et le thermocouple T_{C2} mesurant la température du bloc froid inférieur est relié au contrôleur de température N°3.

Les modules TE sont placés entre les blocs (composante 4 de la figure 4-9) et reliés électriquement via un connecteur de fil. Ceci est mieux que de souder les fils des modules car cela permet de caractériser un nombre voulu de MTE ensemble. Il est important de noter qu'il faut placer dix modules sur un seul étage même si on ne veut caractériser que deux modules, ceci est dans le but d'assurer la pression voulue lors de l'essai.

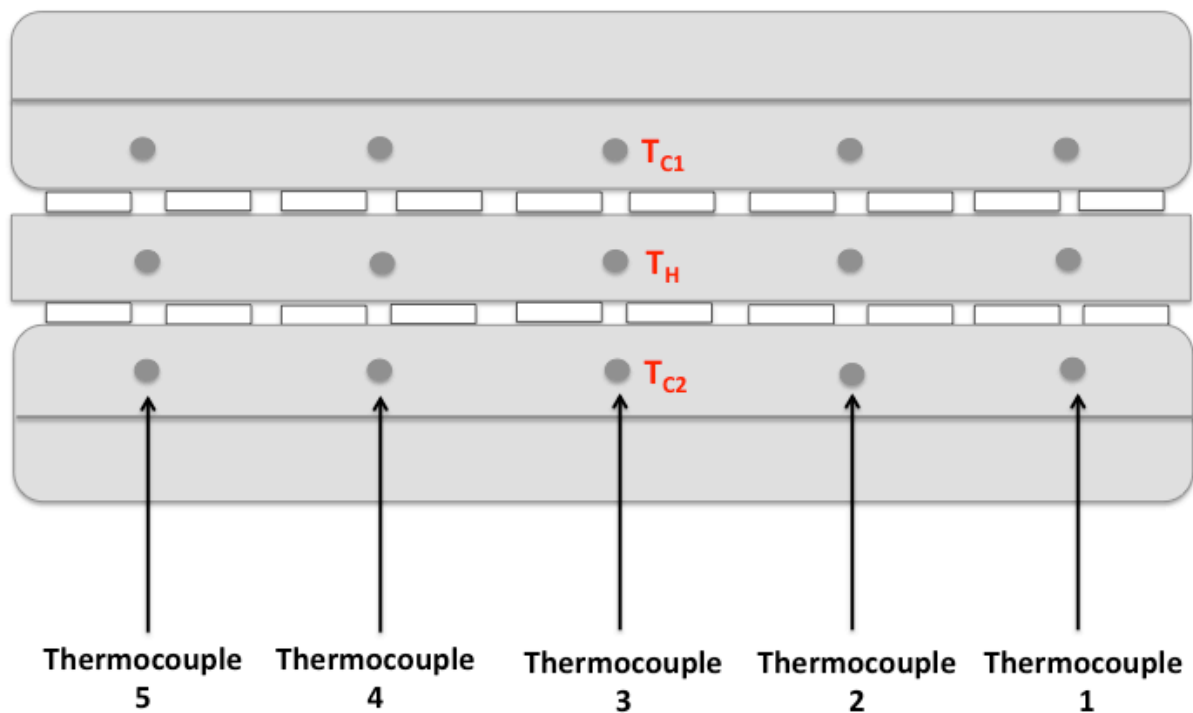


Figure 4-11: Vue schématique de l'arrière du système d'assemblage des MTE et positions des thermocouples

4.2.2 Déroulement d'un test de mesure

On place dix modules côte à côte sur chaque étage, puis on branche seulement les MTE à caractériser au connecteur de fil où ils seront reliés au régulateur électronique de charge (figure 4-12). Les modules peuvent être branchés en série ou en parallèle électriquement. La suite du protocole de mesure est détaillée dans l'annexe C.

Le système de conditionnement et de mesure atteint l'état stationnaire après environ 30 à 35 min (ceci dépend de la température choisie). Une fois l'état stationnaire est atteint, chaque mesure dure 10s, c'est à dire la valeur du courant change toutes les 10s jusqu'à atteindre la valeur maximale fixée. Ce choix sera expliqué à la section 5.2.1.1.

Le contrôleur de température, le régulateur électronique de charge ainsi que l'ordinateur sont les mêmes que ceux utilisés dans le système de conditionnement et de mesure des modules TE. Les résultats obtenus sont visualisés aussi à l'aide du même logiciel « Efficacité 2009 » qui nous permet de tracer la caractéristique I-V. En effet, les valeurs de la tension et du courant déterminées par le régulateur électronique de charge permettent l'évaluation de P_{MTE} ($P_{MTE} = I \times V$).

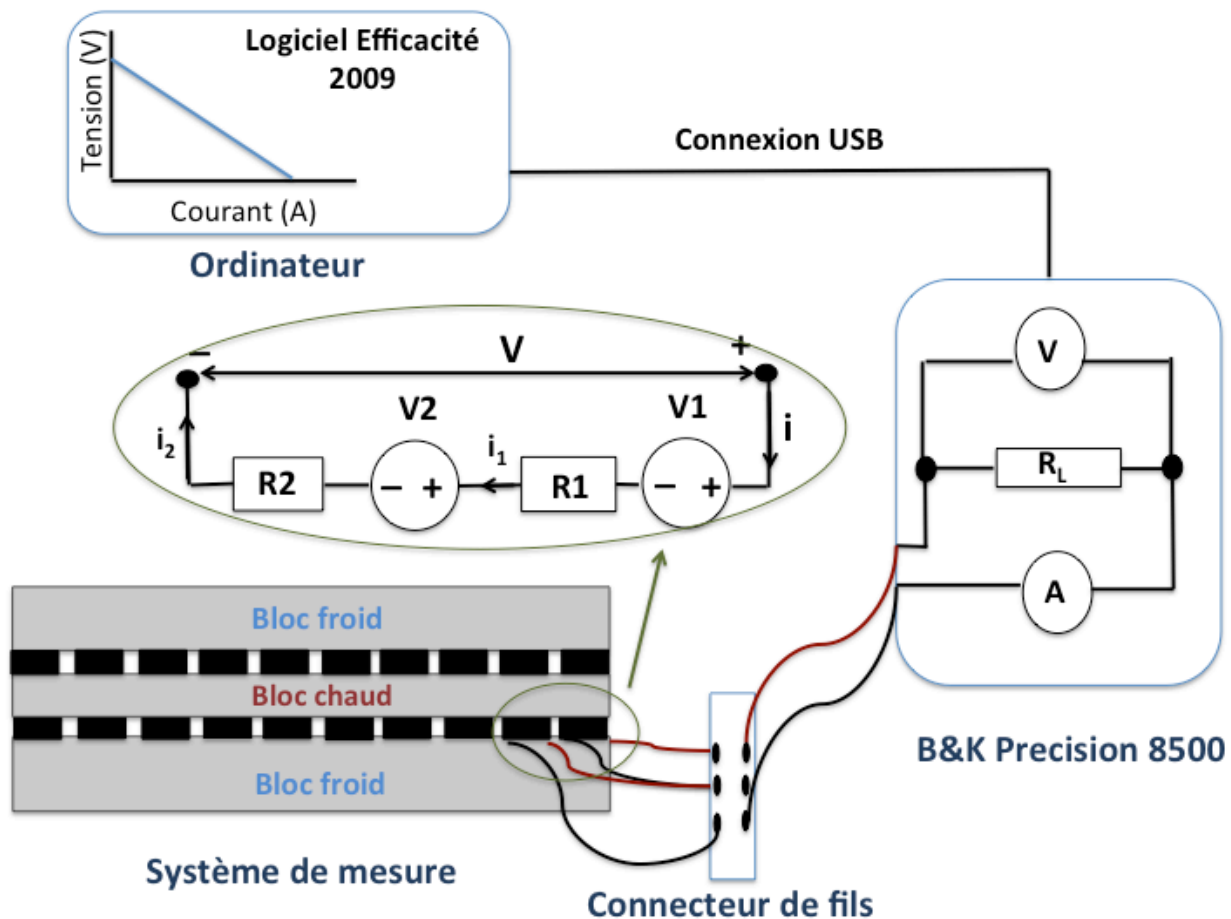


Figure 4-12: Schéma du circuit électrique reliant deux MTE en série (chacun représenté par une tension et une résistance interne) avec le régulateur électronique de charge

Cependant, il n'est pas possible d'évaluer la quantité du flux de chaleur pour ce système de conditionnement et de mesure, étant donné que le système d'assemblage des MTE possède une dimension plus grande faisant qu'il y ait plus de pertes de chaleur. Ainsi, le flux de chaleur n'est pas unidirectionnel. De plus, on devrait s'attendre à des variations dans l'uniformité de la température au sein d'un bloc qui seront évaluées aussi dans le chapitre 5.

Il est aussi remarquable que ce système de conditionnement et de mesure est constitué seulement par l'aluminium (contrairement au système de mesure d'un module où le bloc chaud est en acier et le bloc froid est en aluminium). La raison de ce choix est la grande conductivité thermique de l'aluminium ($237 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) qui facilitera le transfert de la chaleur le long des blocs. L'acier était une bonne solution dans le cas du système d'un seul module puisque sa conductivité thermique relativement faible a favorisé la création d'une différence de température considérable dans le bloc chaud, qui nous a permis d'évaluer le flux de chaleur. Or, la mesure du flux de chaleur n'était pas le premier objectif de la conception du système d'assemblage étant donné ses dimensions. Il a été donc plus judicieux de le fabriquer en aluminium.

On note qu'une première série de mesure a été faite en utilisant le logiciel «Efficacité 2009» et qu'une deuxième série de mesure a été menée manuellement en variant le courant sur le régulateur électronique de charge et en notant la valeur de la tension par un voltmètre. Ceci est dans le but de comparer les deux méthodes de mesure.

4.3 Modules thermoélectriques

Les MTE utilisés durant ce projet (figure 4-13) ont été fabriqués par la compagnie Kryotherm. Ils sont des modules générateurs d'électricité, constitués par des alliages $(\text{Bi}, \text{Sb})_2(\text{Te}, \text{Se})_3$ (de type p et de type n) élaborés au laboratoire de thermoélectricité de l'École Polytechnique de Montréal, par une méthode de métallurgie de poudre suivie de l'extrusion à chaud [33].

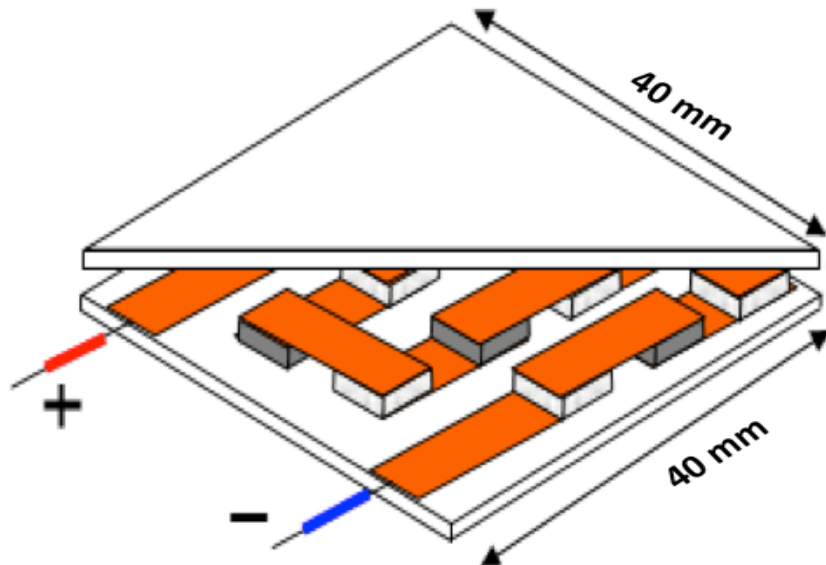


Figure 4-13: Schéma d'un MTE

Leurs dimensions sont de $40 \times 40 \text{ mm}^2$, et ils sont formés par 127 thermocouples. Nous étudierons deux catégories de modules :

- MTE de longueur de patte 1.5 mm
- MTE de longueur de patte 2 mm

Le tableau 4-3 regroupe la description des deux lots de modules TE qui ont été caractérisés par le système de conditionnement et de mesure des MTE présenté à la section 4.1.

Tableau 4-3: Noms et dimensions des modules TE caractérisés dans le système de conditionnement et de mesure d'un seul MTE

Lot	Nombre de modules	Noms	Dimensions (mm)	Longueur des pattes (mm)
Lot 1	3	de « MTE-1.5-1 » jusqu'à « MTE-1.5-3 »	40×40×3.9	1.5
Lot 2	13	de « MTE-2-1 » jusqu'à « MTE-2-13 »	40×40×4.4	2

Pour les modules mesurés dans le système d'assemblage (tableau 4-4), on retrouve le « lot 1 » qui contient les modules mesurés par les deux systèmes et qui vont servir à faire une comparaison entre ces deux systèmes de mesure.

Tableau 4-4: Noms et dimensions des modules TE caractérisés dans le système d'assemblage des MTE

Lot	Nombre de modules	Noms	Dimensions (mm)	Longueur des pattes (mm)
Lot 1	3	de « MTE-1.5-1 » jusqu'à « MTE-1.5-3 »	40×40×3.9	1.5
Lot 3	10	de « MTE-1.5-1A » jusqu'à « MTE-1.5-10A »	40×40×3.9	1.5

Ce chapitre nous a permis de présenter la méthode de caractérisation des modules TE qui consiste en l'utilisation de deux systèmes de mesure. Ce qui est intéressant dans cette approche expérimentale, est l'utilisation d'un système de conditionnement et de mesure d'un seul MTE (présenté en 4.1) capable d'évaluer le flux de chaleur à partir des mesures de la différence de température dans un bloc par les thermocouples, avec le moins de pertes possibles puisque l'emplacement destiné à recevoir les MTE possède leurs sections, ce qui limite les pertes parasites.

L'originalité de ce travail se manifeste aussi par l'utilisation d'un système d'assemblage des MTE capable de mesurer jusqu'à un assemblage de vingt modules en série. Cependant, il existe présentement une limitation à ce système qui apparaît pour un assemblage de plus de cinq modules en série. Dans ce cas, ce n'est pas possible d'utiliser le logiciel « Efficacité 2009 » car il a été programmé de telle sorte qu'il est limité à recevoir une tension maximale de 20V. Si nous voulons caractériser plus que cinq modules en série, il faudra alors opérer avec le régulateur électronique de charge manuellement. L'autre limitation de ce système dans son état actuel est qu'il n'est pas capable d'évaluer le flux de chaleur traversant les modules.

Le prochain chapitre aura pour but de présenter et d'analyser les résultats expérimentaux des mesures effectuées sur des MTE par ces deux systèmes.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Caractérisation d'un module thermoélectrique

Dans cette section, nous allons présenter les résultats obtenus pour la caractérisation d'un module TE par le système de conditionnement et de mesure présenté dans la section 4.1.

Tout d'abord, nous allons évaluer les paramètres TE nécessaires dans la caractérisation d'un module où nous allons étudier la caractéristique I-V. Ensuite, nous allons évaluer l'influence de la pression mécanique sur la puissance électrique générée par le module. Puis, nous allons comparer la performance des modules à différentes longueurs de pattes. Enfin, nous allons comparer les résultats obtenus avec les données de la fiche technique du fabricant avant de valider le système de mesure à partir des résultats de la simulation numérique d'un module TE (un aperçu du logiciel utilisé et des étapes de la simulation seront présentés à la section 5.1.5).

5.1.1.1 Choix des conditions de mesure

Comme il a été mentionné dans le chapitre précédent, le système de mesure des MTE est relié au logiciel « Efficacité 2009 ». Ainsi, avant de commencer la caractérisation des modules, il est important d'introduire des conditions de mesure sur le logiciel. Ces conditions consistent en le choix des valeurs de la tension maximale V_{MAX} , le courant maximum I_{MAX} , la durée du temps Δt nécessaire pour qu'une étape de mesure soit achevée ainsi que le pas de courant ΔI .

V_{MAX} représente une valeur de la tension que l'utilisateur est libre de choisir, elle est généralement supérieure à V_{OC} . I_{MAX} est aussi une valeur choisie par l'utilisateur et qui est supérieure à I_{CC} . Le but de ces choix est d'obtenir une caractéristique I-V complète (contenant les paramètres V_{OC} et I_{CC}).

En effet, le principe des mesures est d'associer à chaque valeur du courant la valeur de la tension produite par le MTE qui lui est correspondante pour obtenir la caractéristique I-V. Pour cela, l'utilisateur choisit l'intervalle et le pas du courant sur le logiciel de mesure. Ainsi, le régulateur électronique de charge fait varier la résistance de charge R_L de telle sorte à atteindre la valeur du courant voulue par l'utilisateur (voir schéma du circuit électrique à la figure 4-6).

Pour le choix de V_{MAX} et I_{MAX} , il faut tout d'abord faire un test préliminaire pour voir quelles sont les valeurs maximales de la tension et du courant que le module peut atteindre. Quant

au choix de Δt , il faut faire des tests à différentes valeurs de Δt pour tester la stabilisation de la température. En effet, le temps Δt représente la durée de temps nécessaire pour qu'une étape de mesure soit achevée, ceci correspond au temps nécessaire pour changer la valeur du courant. Chaque étape de mesure correspond à un point sur la caractéristique I-V. Le but est de trouver la valeur de Δt la plus appropriée pour effectuer nos mesures et pour laquelle la température des blocs chaud et froid soit constante (car si la valeur de Δt est trop élevée, il y a possibilité que les températures des blocs du système subissent une légère variation).

Pour cela, nous avons fixé la valeur du courant maximale ainsi que le pas (généralement on choisit un pas $\Delta I = 0.2A$), ceci nous donnera alors le nombre d'étapes nécessaires pour la caractérisation d'un MTE dans ces conditions. Par la suite, nous avons effectué plusieurs tests sur le module «MTE-2-1» pour une même différence de température ($160^{\circ}C$) et une même pression de serrage ($1.2MPa$) à différentes valeurs de Δt ($\Delta t = 1s, 10s, 20s$ et $40s$) illustrés, respectivement, sur les figures 5-1, 5-2, 5-3 et 5-4. Sur ces courbes, nous allons plutôt nous intéresser à la variation des températures chaude et froide en fonction du courant et expliquer la cause de cette variation, s'il y a lieu.

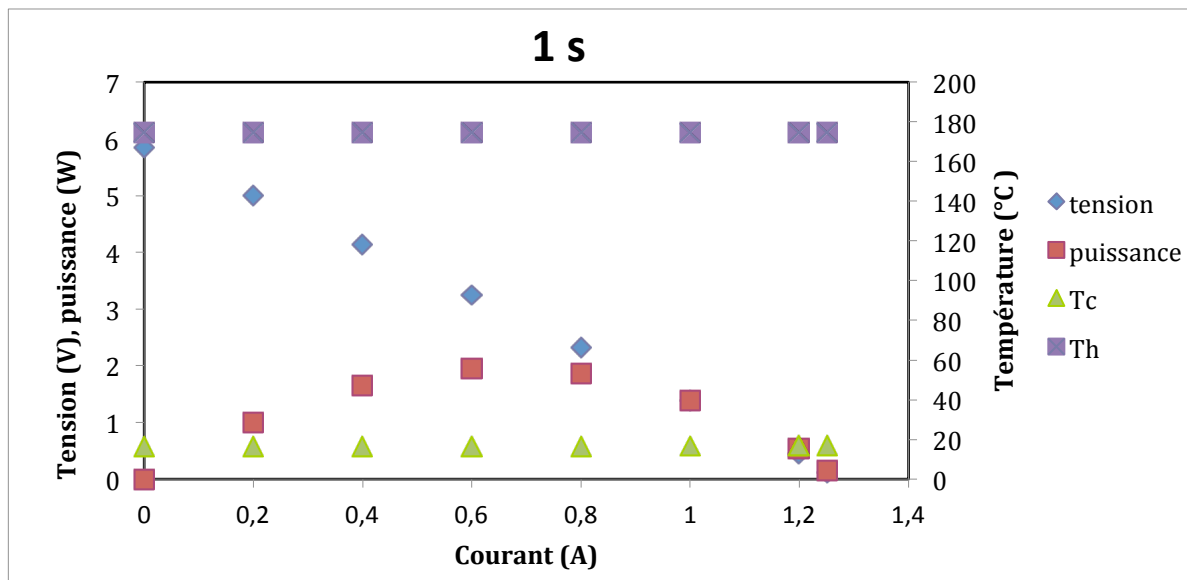


Figure 5-1: Test de mesure effectué sur le module MTE-2-1 pour $\Delta t = 1s$, $\Delta T = 160^{\circ}C$ et $P = 1.2MPa$

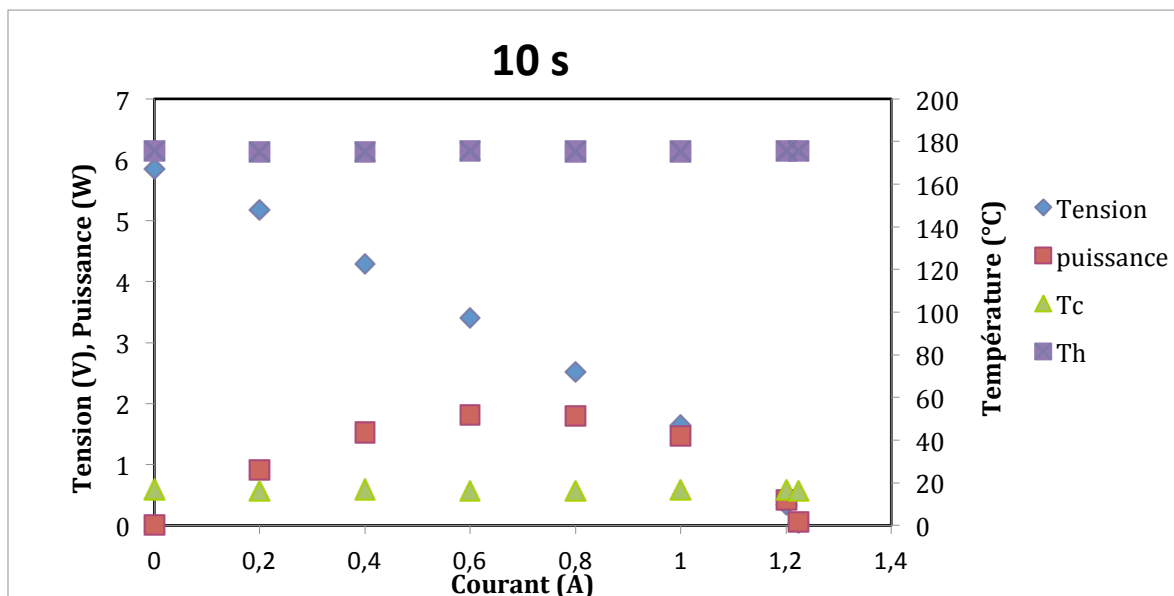


Figure 5-2: Test de mesure effectué sur le module MTE-2-1 pour $\Delta t=10s$, $\Delta T=160^{\circ}C$ et $P=1.2MPa$

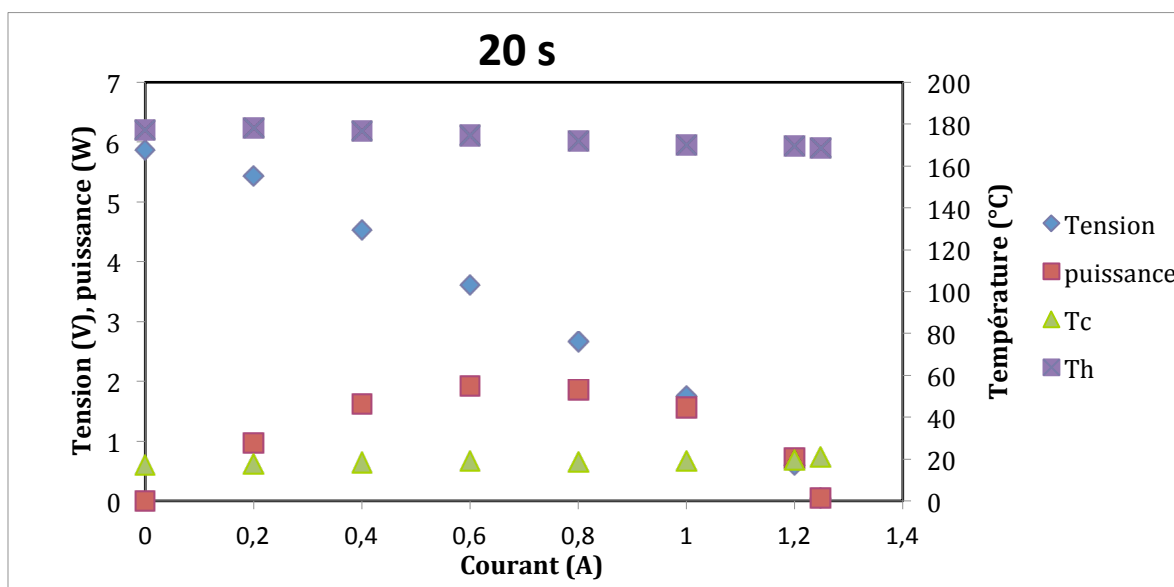


Figure 5-3: Test de mesure effectué sur le module MTE-2-1 pour $\Delta t=20s$, $\Delta T=160^{\circ}C$ et $P=1.2MPa$

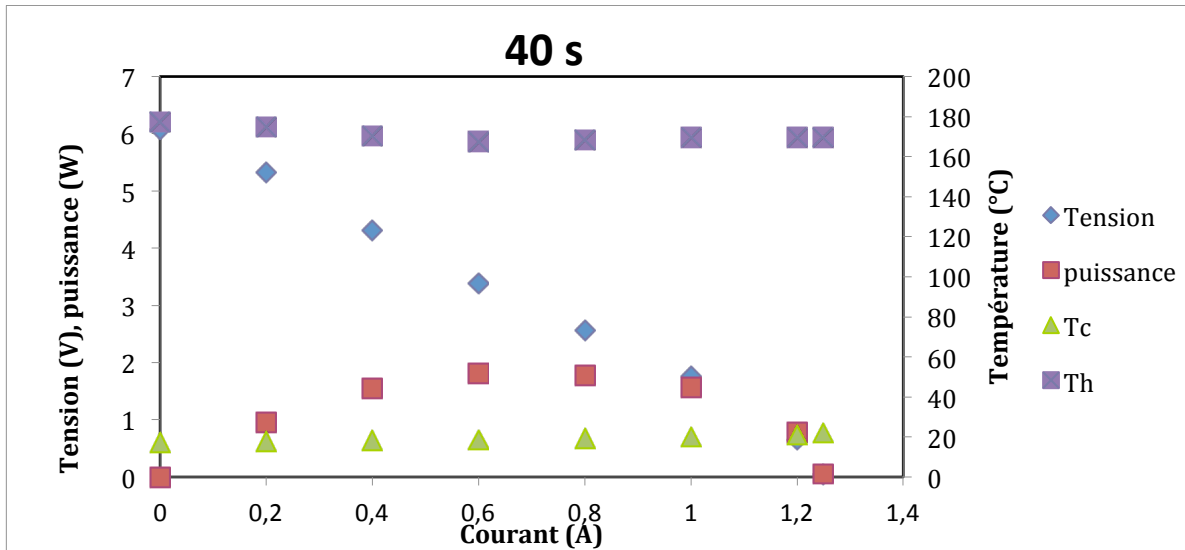


Figure 5-4: Test de mesure effectué sur le module MTE-2-1 pour $\Delta t=40s$, $\Delta T=160^\circ C$ et $P=1.2MPa$

Sur les figures présentées ci dessus, T_C et T_H représentent, respectivement, les valeurs de la température du bloc froid et celle du bloc chaud, établis lorsque l'état stationnaire est atteint.

Nous remarquons que pour $\Delta t=20s$ et $\Delta t=40s$, il y a de légères variations des valeurs de la température du bloc chaud et celle du bloc froid. Cependant, pour $\Delta t=1s$ et $\Delta t=10s$, nous constatons la présence des points alignés et une légère variation de la température au fur et à mesure que le courant change. Nous constatons aussi un changement dans la valeur du courant en court circuit I_{CC} entre $\Delta t=1s$ et $\Delta t=40s$.

À ce niveau, il est important d'expliquer les phénomènes physiques qui se produisent lors des mesures : quand les systèmes de chauffage et de refroidissement stabilisent T_H et T_C aux températures désirées par l'utilisateur, la différence de température ΔT et la tension en circuit ouvert V_{OC} atteignent une certaine valeur. À ce moment, les différentes résistances de charge R_L appliquées par le régulateur électronique de charge vont produire différentes valeurs du courant. La variation du courant va engendrer un changement du flux de chaleur à la frontière de contact entre les deux matériaux formant la jonction, dû à l'effet Peltier (équation 5.1) [34]

$$Q_p = \alpha_{pn} TI \quad (\text{équation 5.1})$$

Avec Q_p : la chaleur Peltier (W)

α_{pn} : le coefficient de Seebeck (V.K⁻¹)

T : la température chaude ou froide (°C)

I : le courant (A)

Après une certaine durée de temps, le changement du flux de chaleur entraîne une variation dans la différence de température imposée. Autrement dit, ceci résultera en une température de chauffage ou de refroidissement (T_H et T_C) différente sur les deux surfaces du module TE, jusqu'à ce que le système de régulation de température ajuste le système de chauffage pour pouvoir récupérer la différence de température désirée.

Ainsi, quand la variation du courant prend un temps plus long (à partir de 10s), l'effet Peltier est plus prononcé, ce qui implique la génération d'une chaleur responsable de la perturbation de la température dans cet intervalle de temps. Évidemment, si la température est perturbée, ceci va influencer sur la différence de température ΔT et par conséquent sur les quantités mesurées à partir de ce paramètre comme la tension, le courant et la puissance.

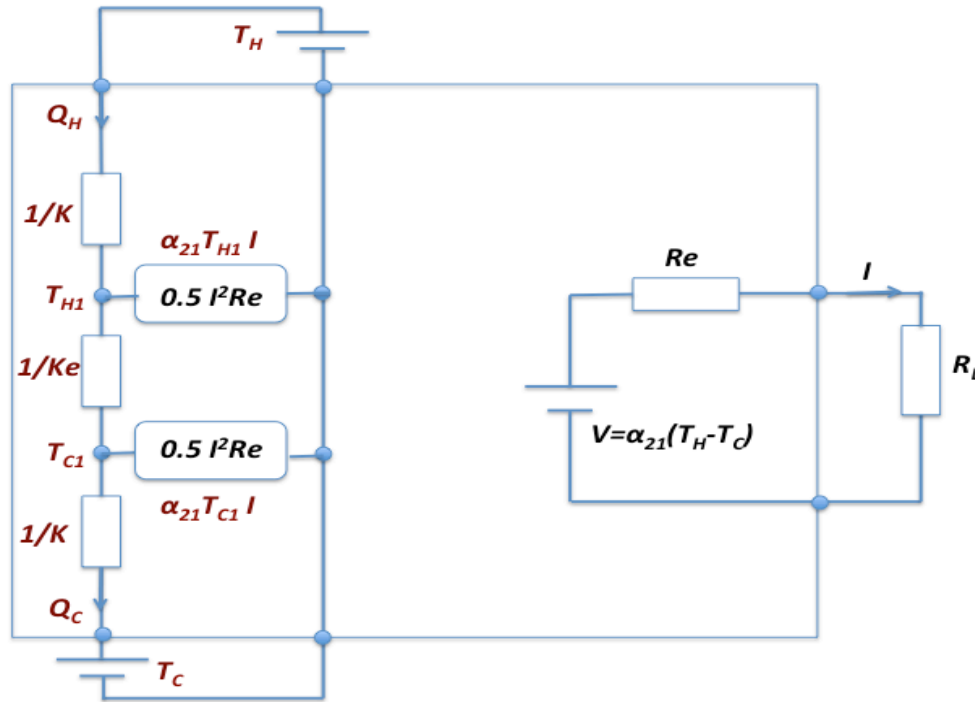


Figure 5-5: Modèle d'un circuit équivalent électrique (en noir) et thermique (en rouge) dans un thermocouple

La figure 5-5 présente un modèle physique du circuit électrique et thermique dans un thermocouple qui montre les éléments mis en jeu lors de la stabilisation du système. Les équations 2.8 et 2.9 décrivent les relations entre les différentes variables. Notons que T_{H1} et T_{C1} représentent, respectivement, la température à la jonction chaude et la température à la jonction froide

Pour mieux visualiser les résultats, nous avons tracé seulement la variation de la température du bloc chaud en fonction du courant pour les quatre valeurs de Δt étudiées par souci de clarté (figure 5-6). Il est clair d'après cette figure que pour $\Delta t = 1$ s (durée totale du test est de 7s), la température est stable. Il est important de mener le test rapidement pour éviter la perturbation de la température due à l'effet Peltier, sinon il pourrait y avoir une sous estimation des paramètres mesurés. Par conséquent, nous avons décidé de mener toutes les mesures à $\Delta t = 1$ s.

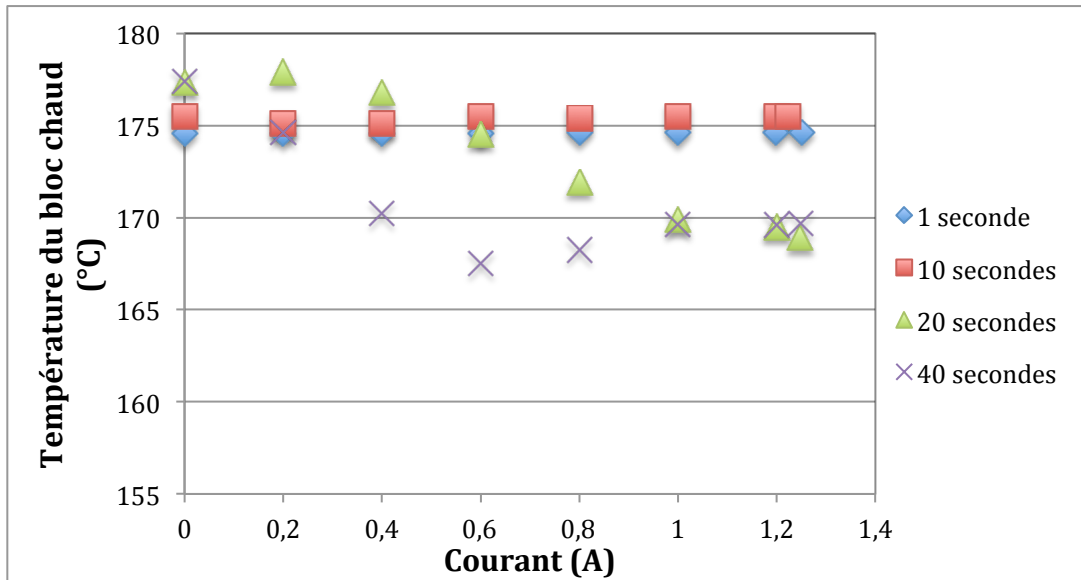


Figure 5-6: Variation de la température du bloc chaud en fonction du courant à différentes Δt pour le module MTE-2-1

5.1.1.2 Paramètres mesurés lors d'un test et reproductibilité des mesures

Une fois que l'état stationnaire est atteint (les températures des côtés chaud et froid se sont stabilisées), il est possible d'effectuer un balayage courant-tension en variant la résistance de charge R_L . Nous obtenons alors la courbe de la figure 5-7 qui illustre la caractéristique courant-tension (en bleu) et la caractéristique courant-puissance (en rouge) pour le module MTE-1.5-1 obtenues à une différence de température $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ ($T_C = 50^\circ\text{C}$ et $T_H = 150^\circ\text{C}$) et une pression de serrage de 1.2 MPa. Le lissage des courbes est effectué à partir des valeurs mesurées, illustrées par les symboles solides.

À partir de ces courbes, on peut relever les valeurs des grandeurs suivantes : courant en court circuit I_{CC} , tension en circuit ouvert V_{OC} , puissance maximale P_{MAX} ainsi que la résistance interne du module R .

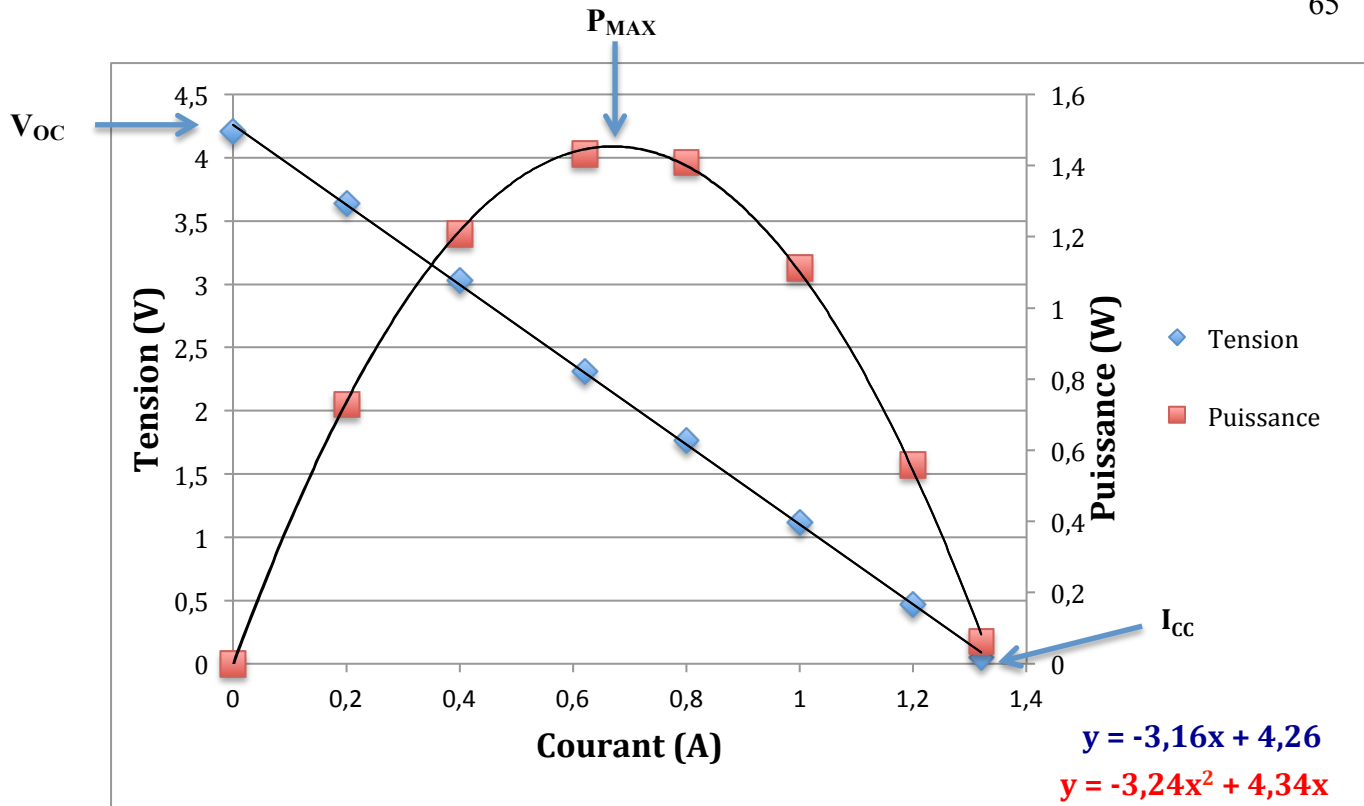


Figure 5-7 : Caractéristiques courant-tension (en bleu) et courant-puissance (en rouge) pour le module MTE-1.5-1, obtenues à $T_C = 50^\circ\text{C}$ et $T_H = 150^\circ\text{C}$

En effet, la tension en circuit ouvert V_{OC} correspond à la valeur de la tension quand le courant est nul (intersection de la droite bleue avec l'axe des ordonnées sur la figure 5-7). Le courant en court circuit I_{CC} correspond à la valeur du courant lorsque la tension est nulle (intersection de la droite bleue avec l'axe des abscisses sur la figure 5-7). P_{MAX} représente le pic de la courbe courant-puissance, calculée à partir de l'équation de cette caractéristique (équation en rouge sur la figure 5-7).

L'équation caractéristique de la droite courant-tension (équation en bleu qui se trouve sur la figure 5-7) est définie par l'équation 2.19 pour un MTE dans le modèle « idéal » :

$$V_{MTE} = -NR_e I + N\alpha_{pn} \Delta T_0.$$

Cependant, les modules étudiés dans ce projet correspondent au modèle « réaliste », par conséquent, l'équation qui régit la caractéristique I-V est l'équation 2.24 :

$$V_{MTE} = N\alpha_{pn} \frac{(T_H - T_C)}{1 + 2r \frac{l_c}{l}} - NRI$$

Grâce à cette équation, il est possible de déterminer trois paramètres importants dans la caractérisation d'un MTE en partant des valeurs de V_{OC} et I_{CC} . En effet, la pente de cette droite correspond à la valeur de la résistance électrique R multipliée par le nombre de thermocouples N , et qui est exprimée comme suit :

$$NR = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (\text{équation 5.2})$$

L'autre paramètre que nous pouvons relever est le coefficient de Seebeck α_{pn} , calculé quand le courant est nul, c'est à dire en condition de circuit ouvert, et qui s'écrit comme :

$$N\alpha_{pn} = \frac{V_{OC}(1 + 2r \frac{l_c}{l})}{(T_H - T_C)} \quad (\text{équation 5.3})$$

D'autre part, il est possible d'évaluer le flux de chaleur Q_H traversant le module à l'aide des deux thermocouples installés dans le bloc chaud (comme expliqué dans le chapitre 4). Connaissant le flux de chaleur, nous pouvons déterminer la conductance thermique K du module qui s'exprime comme étant le rapport entre le flux de chaleur traversant le MTE en condition de circuit ouvert et la différence de température entre les deux surfaces du module :

$$K = \frac{Q_H(1 + 2r \frac{l_c}{l})}{(T_H - T_C)} \quad (\text{équation 5.4})$$

Pour l'étude de la reproductibilité des mesures, des tests ont été effectués deux fois de suite pour évaluer les incertitudes de mesure. Pour ce faire, nous avons effectué deux mesures successives sur un même module en l'ayant démonté entre les deux essais. Ceci permettra d'observer l'influence du montage sur la performance du MTE.

Le tableau 5-1 regroupe les valeurs des incertitudes calculées sur les paramètres suivants : V_{OC} , I_{CC} , P_{MAX} , I (à P_{MAX}) et V (à P_{MAX}), pour le module MTE-1.5-1 à $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$ et à une pression de serrage de 1.2 MPa.

Tableau 5-1: Calcul des incertitudes de mesures pour le module MTE-1.5-1 à une différence de température $T_C=50^\circ\text{C}$, $T_H=150^\circ\text{C}$

Variable	1 ^{ère} valeur mesurée	2 ^{ème} valeur mesurée	Valeur moyenne	Écart type	Incertitude relative
V_{OC}	4.26V	4.27V	4.27V	$\pm 0.009\text{V}$	0.21%
I_{CC}	1.35A	1.34A	1.35A	$\pm 0.002\text{A}$	0.18%
P_{MAX}	1.45W	1.46W	1.46W	$\pm 0.004\text{W}$	0.29%
I (à P_{MAX})	0.68A	0.68A	0.68A	$\pm 0.001\text{A}$	0.17%
V (à P_{MAX})	2.14V	2.15V	2.15V	$\pm 0.004\text{V}$	0.20%

Pour le module MTE-1.5-1, V_{OC} a été mesurée deux fois à une différence de température $T_C=50^\circ\text{C}$, $T_H=150^\circ\text{C}$ et à une pression de serrage de 1.2 MPa. Les deux essais effectués sur ce module montrent que la tension en circuit ouvert n'a varié que de très peu (10 mV). L'écart entre les mesures est faible et se situe dans l'intervalle de précision de l'équipement de mesure (régulateur électronique de charge). Cet appareil fournit les valeurs de la tension avec une précision de $\pm 0.05\text{V}$ (voir tableau 4-2), ici la tension du module MTE-1.5-1 varie de 0.01V.

Pour les mesures du courant (I_{CC} et I (à P_{MAX})), nous constatons aussi que les écarts entre les deux mesures se situent dans l'intervalle de précision de la mesure du courant du régulateur électronique de charge ($\pm 0.1\text{A}$). La même constatation est faite pour les mesures de la puissance où le régulateur électronique la mesure avec une précision de $\pm 1.1\text{W}$.

Nous remarquons que les incertitudes de mesure pour la tension, le courant et la puissance sont inférieures aux valeurs de la précision de l'appareil régulateur de charge électronique, ce qui laisse conclure que la reproductibilité des mesures est acceptable.

Les résultats obtenus pour le module MTE-1.5-1 sont regroupés dans le tableau 5-2. La valeur de NR , déterminée par la pente de la droite courant-tension (équation 2.24), représente la valeur de la résistance électrique interne du module.

Tableau 5-2: Paramètres TE obtenus pour le module MTE-1.5-1 pour une différence de température $T_C=50^\circ\text{C}$, $T_H=150^\circ\text{C}$

Paramètres	Valeur obtenue
V_{OC} (V)	$4.27 \pm 0.21\%$
I_{CC} (A)	$1.35 \pm 0.18\%$
P_{MAX} (W)	$1.46 \pm 0.29\%$
NR (Ω)	$3.17 \pm 0.38\%$

Quant à la valeur du coefficient de Seebeck α_{pn} (qui est une valeur moyenne, dans la gamme de température mesurée, de la différence entre le coefficient de Seebeck du matériau p et celui du matériau n), nous remarquons d'après l'équation 5.4 qu'elle dépend du facteur $(1+2rl_c/l)$ que nous ne pouvons pas déterminer (nous n'avons pas la valeur de λ_{pn} où $r = \lambda_{pn}/\lambda_C$). Or, l'évaluation du coefficient de Seebeck n'est pas nécessaire dans la caractérisation d'un module TE. Elle servira juste d'un outil de validation des mesures effectuées sur le matériau constituant le module TE (par exemple si on veut comparer cette valeur avec des mesures faites par un test d'Harman).

Nous avons donc relevé les valeurs de α_{pn} en supposant que le module étudié appartient au modèle «idéal» et en appliquant l'équation suivante :

$$N\alpha_{pn} = \frac{V_{OC}}{(T_H - T_C)} \quad (\text{équation 5.5})$$

Pour tester la fiabilité de nos mesures, le coefficient α_{pn} a été déterminé à deux différences de température ($T_H-T_C=100^\circ\text{C}$ et $T_H-T_C=140^\circ\text{C}$). Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 5-3.

Tableau 5-3: Coefficient de Seebeck du MTE-1.5-1 à deux différences de température

Paramètre	$T_H=150^\circ\text{C}$, $T_C=50^\circ\text{C}$	$T_H=160^\circ\text{C}$, $T_C=20^\circ\text{C}$
V_{OC} (V)	$4.27 \pm 0.21\%$	$5.94 \pm 0.3\%$
α_{pn} ($\mu\text{V/K}$)	$335 \pm 2.9\%$	$334 \pm 2.22\%$

Il est clair d'après le tableau 5-3 que la valeur du coefficient de Seebeck varie légèrement (une différence de 0.3%) pour les deux différences de température étudiées. Ceci laisse conclure que les mesures effectuées permettent de déterminer la valeur du coefficient de Seebeck pour un module appartenant au modèle «idéal». Cette valeur est probablement proche du coefficient de Seebeck réel.

5.1.2 Influence de la pression mécanique sur la puissance générée

La pression appliquée sur le module joue un rôle important dans sa caractérisation. Ainsi, l'étude de son influence sur la puissance électrique générée était nécessaire.

Pour ce faire, nous avons eu recours à deux modules appartenant au «lot 1»: MTE-1.5-2 et MTE-1.5-3. Ces deux modules ont subi des tests à neuf valeurs de pression (une pression variant de 0.055 MPa à 1.2 MPa) pour une différence de température entre $T_C = 50^\circ\text{C}$ et $T_H = 150^\circ\text{C}$. Puis, nous avons relevé pour chaque mesure la valeur de la puissance maximale générée. Chaque module a été mesuré deux fois de suite pour pouvoir tester sa reproductibilité.

La figure 5-8 représente l'évolution de la puissance maximale générée par les modules MTE-1.5-2 et MTE-1.5-3 en fonction de la pression pour une différence de température $T_C = 50^\circ\text{C}$ et $T_H = 150^\circ\text{C}$.

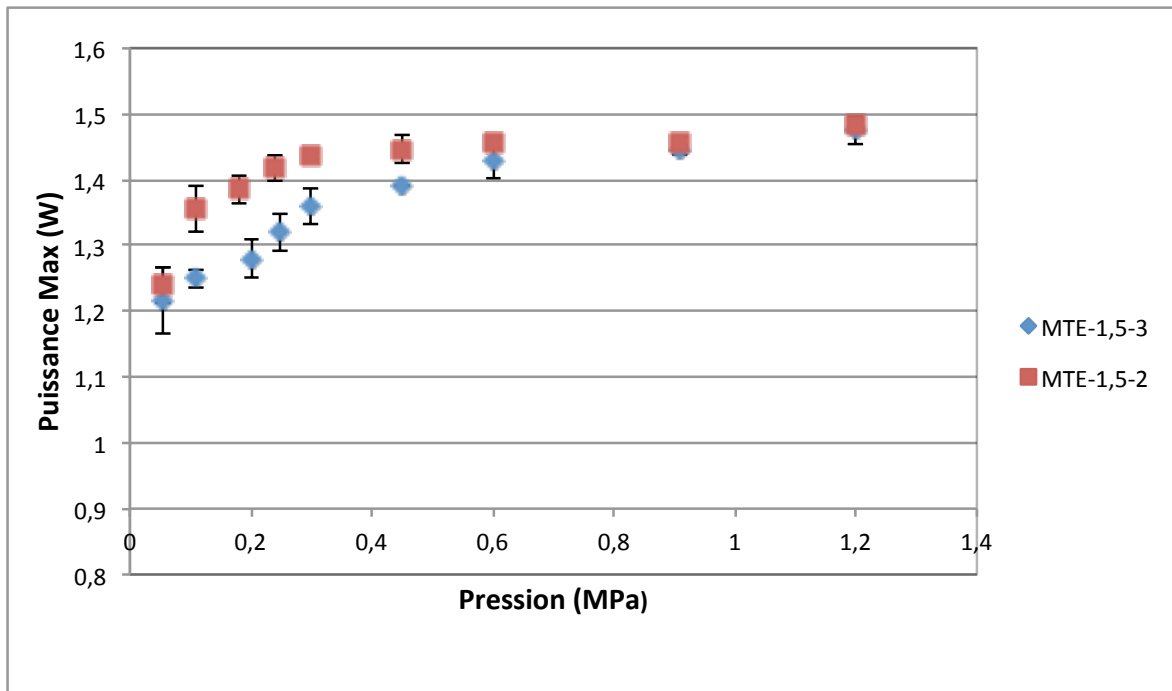


Figure 5-8 : Évolution de la puissance maximale en fonction de la pression appliquée sur les modules MTE-1.5-2 et MTE-1.5-3 à $T_C = 50^\circ\text{C}$ et $T_H = 150^\circ\text{C}$

D'après la figure précédente, il est clair que la puissance maximale augmente avec la pression jusqu'à atteindre un plateau pour les deux modules étudiés. En effet, lorsque la pression mécanique augmente, les conductances de contact thermique augmentent, ce qui laisse passer une quantité plus importante du flux de chaleur à travers le module. Ceci rend la tension aux bornes du module plus élevée et par conséquent, augmente la puissance générée.

Nous constatons que la valeur de la puissance maximale passe de 1.2W à 1.48W pour une pression qui varie de 0.055 MPa à 1.2 MPa pour le module MTE-1.5-2. Ainsi, la puissance maximale augmente graduellement de 0.05 MPa à 0.45 MPa, puis suit une tendance de saturation.

En outre, Custom Thermoelectric [35] propose une pression optimale appliquée sur un module TE (de dimensions $40 \times 40 \text{ mm}^2$) de 1.275 MPa, et si cette valeur est dépassée, il y a risque de détérioration du MTE. Cette valeur de la pression correspondrait à une force de serrage de 400 lb pour un module TE de surface $40 \times 40 \text{ mm}^2$, ce qui représente la valeur maximale de la force qu'on peut appliquer sur le MTE avec le système de mesure décrit à la section 4.1. Au delà de cette valeur, il est possible d'endommager le module.

Comme nous l'avons déjà mentionné, chaque module a été mesuré deux fois de suite après l'avoir démonté et réinstallé. Ceci a engendré une marge d'erreur sur chaque point mesuré qui a été mise en évidence sur la figure 5-8 par les barres d'erreur. Nous constatons alors que les incertitudes sur les mesures diminuent à pression élevée, ceci laisse imaginer qu'une faible quantité du flux de chaleur s'échappe sur les bords quand le contact entre le MTE et le bloc chaud n'est pas efficace.

Par conséquent, il est important d'appliquer la pression optimale recommandée pour minimiser les incertitudes sur les mesures et obtenir les meilleures valeurs des paramètres mesurés.

5.1.3 Comparaison entre des modules TE à différentes longueurs de pattes

Nous avons à notre disposition deux catégories de modules TE qui possèdent les mêmes dimensions, même type de matériaux formant les pattes n et p (alliages $(\text{Bi, Sb})_2(\text{Te, Se})_3$, et qui proviennent de la même compagnie de fabrication des MTE (voir le tableau 4.3). Cependant, ces modules diffèrent par leur longueur de pattes :

- modules de longueur de pattes 2 mm « modules à pattes longues »
- modules de longueur de pattes 1.5 mm « modules à pattes courtes »

Nous avons effectué deux séries de mesures : une première étude a été faite sur les modules à pattes longues, et une deuxième étude a été menée sur les modules à pattes courtes. Pour chaque module mesuré, nous avons relevé les paramètres suivants : I_{CC} , V_{OC} , P_{MAX} , Q_H et η . Les résultats individuels obtenus pour chaque module sont regroupés dans l'annexe D. Ces mesures ont été faites à deux différences de température et une même pression de serrage de 1.2 MPa.

Le but de cette étude est de voir l'effet de la longueur des pattes des MTE sur les paramètres mesurés. Pour cela, nous avons calculé la moyenne des valeurs de chaque paramètre mesuré (pour évaluer tous les modules du lot) ainsi que les incertitudes entre les modules (une moyenne sur un total de 14 modules pour les MTE à pattes longues et 3 modules pour les MTE à pattes courtes) à partir des données de l'annexe D. Il est important de noter que les incertitudes introduites dans les tableaux de l'annexe D sont une estimation de la reproductibilité de chaque mesure. Par contre, les barres d'erreur indiquées sur les histogrammes (section 5.1.3) donnent la

variabilité entre les modules du même lot, pour chaque propriété. La variabilité entre les modules est plus large pour une différence de température plus élevée.

Par ailleurs, on s'attend normalement à ce que les paramètres mesurés ci dessous (I_{CC} , V_{OC} , Q_H , P_{MAX} , et η_{MAX}) soient presque identiques pour des modules TE appartenant à un même lot (possédant les mêmes dimensions et les mêmes matériaux constitutifs). Or, il existe une variabilité, parfois large, entre ces modules. Pour donner un exemple de quantification de cet écart, nous avons choisi de comparer la tension en circuit ouvert pour les modules MTE-1.5-2 et MTE-1.5-3 appartenant au «lot 1» de l'annexe D ($T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$). Ces deux modules présentent l'écart le plus grand de V_{OC} dans ce lot, on note $V_{OC}= 4.21 \text{ V} \pm 0.008\text{V}$ (reproductibilité) pour MTE-1.5-2 et $V_{OC}=4.32 \text{ V} \pm 0.009 \text{ V}$ pour MTE-1.5-3, l'écart est évalué à 0.11V.

Nous remarquons que l'écart entre les deux modules dépasse les incertitudes de mesure de chaque MTE. Ceci confirme la non-uniformité des MTE appartenant à un même lot, autrement dit, leurs réponses TE ne sont pas identiques. Cette dissemblance est engendrée par la dispersion intrinsèque des modules due aux incertitudes de fabrication, notamment par la différence de la résistance des contacts métalliques ajoutés lors de la fabrication des MTE qui diffère d'un module à l'autre.

5.1.3.1 Courant en court circuit

Le courant en court circuit I_{CC} a été déterminé pour chaque module mesuré à partir de la caractéristique I-V, comme montré dans la section 5.1.1.2.

La figure 5-9 montre une comparaison des valeurs de I_{CC} pour les MTE à pattes courtes et les MTE à pattes longues pour des tests effectués à deux gammes de températures. Les barres d'erreur sur les histogrammes représentent la variabilité entre les modules appartenant au même lot.

D'après la figure 5-9, le courant en court circuit pour les MTE à pattes courtes ($I_{CC}= 1.87\text{A}\pm0.05$) est supérieur à celui des MTE à pattes longues ($I_{CC}= 1.3\text{A}\pm0.04$) pour $T_C= 20^\circ\text{C}$ et $T_H=160^\circ\text{C}$.

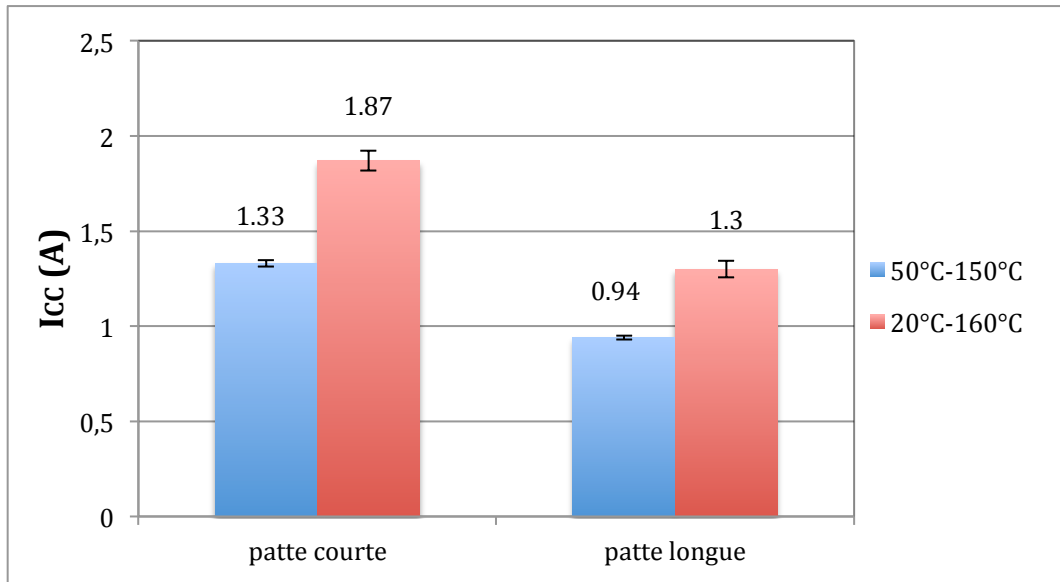


Figure 5-9: Variation du courant en court circuit en fonction de la longueur des pattes du MTE et de la différence de température

Le même phénomène est observé pour la gamme de température $T_C = 50^\circ\text{C}$ et $T_H = 150^\circ\text{C}$. Ainsi, quelle que soit la différence de température imposée sur les surfaces du module à caractériser, les MTE à pattes courtes possèdent la valeur la plus élevée de I_{CC} .

En effet, d'après l'équation 2.26 : $I_{CC} = \frac{\alpha_{pn}(T_H - T_C)}{R(1 + 2r \frac{l_c}{l})}$, le courant en court circuit dépend

de la longueur des pattes l . Ceci est dû à la résistance électrique interne qui dépend de la longueur des pattes l du module TE. Plus les pattes sont courtes, moins il y a de résistance électrique et donc, plus le courant électrique qui circule à travers le module est grand. Une augmentation de 30% dans la longueur des pattes a engendré une baisse de 29% dans la valeur du courant.

5.1.3.2 Flux de chaleur

Le flux de chaleur Q_H qui traverse le module a été mesuré pour les deux catégories de MTE que nous étudions dans cette section. Le graphe de la figure 5-10 montre les valeurs de Q_{MAX} (qui représente la valeur maximale de Q_H enregistrée lors d'un test) pour les deux catégories de modules et à deux différences de température.

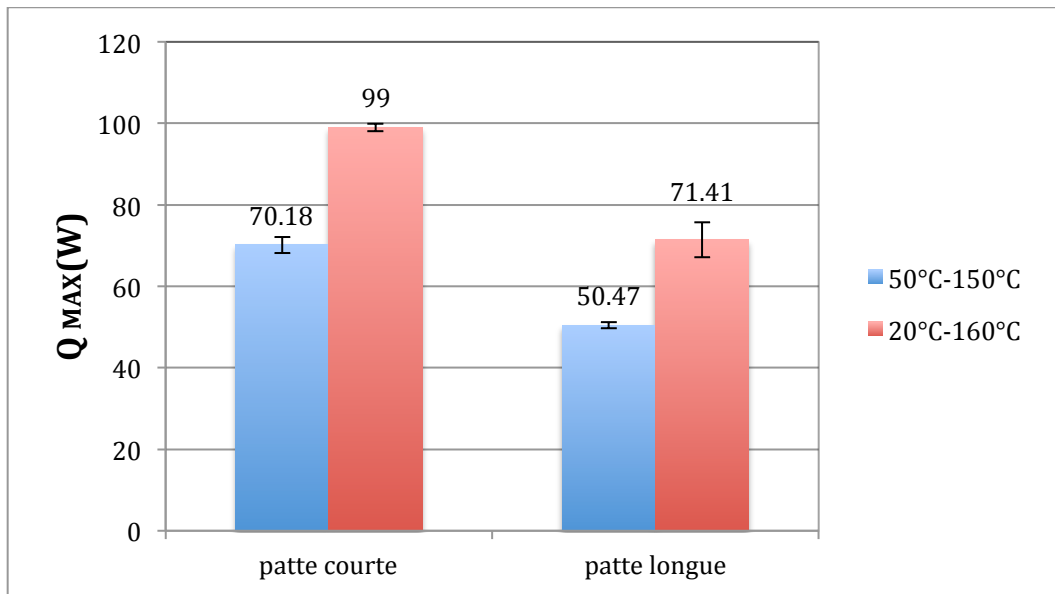


Figure 5-10: Variation du flux de chaleur en fonction de la longueur des pattes du MTE et de la différence de température

Comme nous l'avons démontré au chapitre 4, les mesures du flux de chaleur ne sont pas précises (de l'ordre de 2.8% pour une différence de température de 100°C). C'est pour cette raison qu'il peut y avoir une erreur dans la mesure de cette quantité qui est plus large que l'écart dû à la variabilité entre les modules (traduit par les barres d'erreur).

Nous constatons que plus les pattes sont courtes, plus le flux de chaleur traversant le module est important, et ce pour les deux gammes de température présentées. En effet, la quantité du flux de chaleur qui circule à travers le MTE dépend de la conductance thermique des pattes. Plus les pattes sont courtes, plus il y a de conductance thermique et donc, une quantité plus grande du flux de chaleur circule à travers le module.

Le schéma de la figure 5-11 illustre toutes les conductances thermiques dans un thermocouple formé par deux pattes n et p .

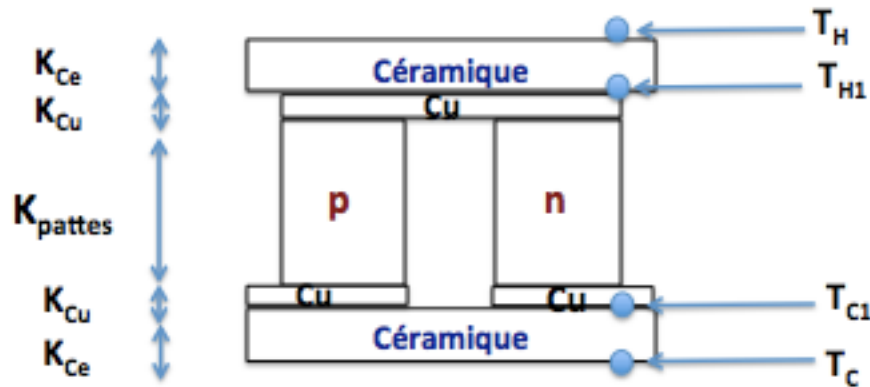


Figure 5-11: Schéma décrivant les conductances thermiques dans un thermocouple appartenant au modèle plus «réaliste»

La conductance thermique totale d'un MTE est la somme de la conductance thermique de la céramique, la conductance thermique des soudures en cuivre et la conductance thermique des pattes qui dépend du matériau (voir équation 2.10). La conductance des pattes est généralement supérieure à K_{Ce} et K_{Cu} , ainsi, c'est la conductance thermique des pattes qui diffère entre les modules à pattes longues et les modules à pattes courtes.

Par ailleurs, plus la différence de température est grande, plus le flux de chaleur traversant le module l'est. Or, la céramique et les contacts de cuivre se comportent comme des barrières thermiques, qui une fois traversées par un flux de chaleur important provoque une chute de température grandissante.

En effet, on sait que :

$$\frac{(T_H - T_C)}{\Theta_{Module}} = \frac{(T_H - T_{H1})}{\Theta_{Ce}} \quad (\text{équation 5.6})$$

Avec : $(T_H - T_C)$ la différence de température traversant le module, $(T_H - T_{H1})$ la différence de température à travers la céramique, Θ_{Module} la résistance thermique totale du MTE en K/W et Θ_{Ce} la résistance thermique de la céramique en K/W.

Le modèle présenté par l'équation 5.6 est cohérent avec celui de l'équation 2.21 dans la mesure où on a fait les approximations suivantes :

$$\lambda_{Cu} \ll \lambda_{Ce}$$

$$l_{Cu} < l_{Ce}$$

$$l \gg l_{Ce}$$

Si on considère les modules à pattes courtes pour $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$ (figure 5-10), on peut en déduire la résistance thermique totale du MTE qui est évaluée à 1.42 K/W. On en déduit aussi que la résistance thermique de la céramique ($\theta_{Ce}=0.018$ K/W, calculée via la relation $\theta_{Ce}=e/(\lambda_{Ce}\times S)$ où e est l'épaisseur de la céramique, λ_{Ce} est la conductivité thermique de la céramique (alumine), S est la surface de la plaque de céramique) fait baisser la température à la jonction chaude du module de 1.26°C de la température à la surface chaude du MTE (150°C), et elle augmente la température à la jonction froide du module de 1.26°C de la température à la surface froide du MTE (50°C). Ceci engendre une diminution de l'ordre de 2.56% de la différence de température à travers les jonctions chaude et froide.

Si on s'intéresse maintenant aux modules à pattes longues pour la même différence de température $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$ (figure 5-10), on retrouve que la présence des plaques de céramique diminue la différence de température à travers les jonctions du module de 1.8%.

La diminution de la différence de température à travers les jonctions est plus prononcée pour les modules à pattes courtes. Ceci aura des répercussions sur la puissance générée et pourrait expliquer les écarts dans les valeurs de la tension entre les deux catégories de modules qu'on verra dans la prochaine section.

5.1.3.3 Tension en circuit ouvert

La tension en circuit ouvert V_{OC} a été déterminée à partir de la caractéristique I-V pour tous les modules TE en question. La moyenne de V_{OC} calculée sur les modules à pattes longues et les modules à pattes courtes est illustrée sur les histogrammes de la figure 5-12 pour les deux plages de température étudiées.

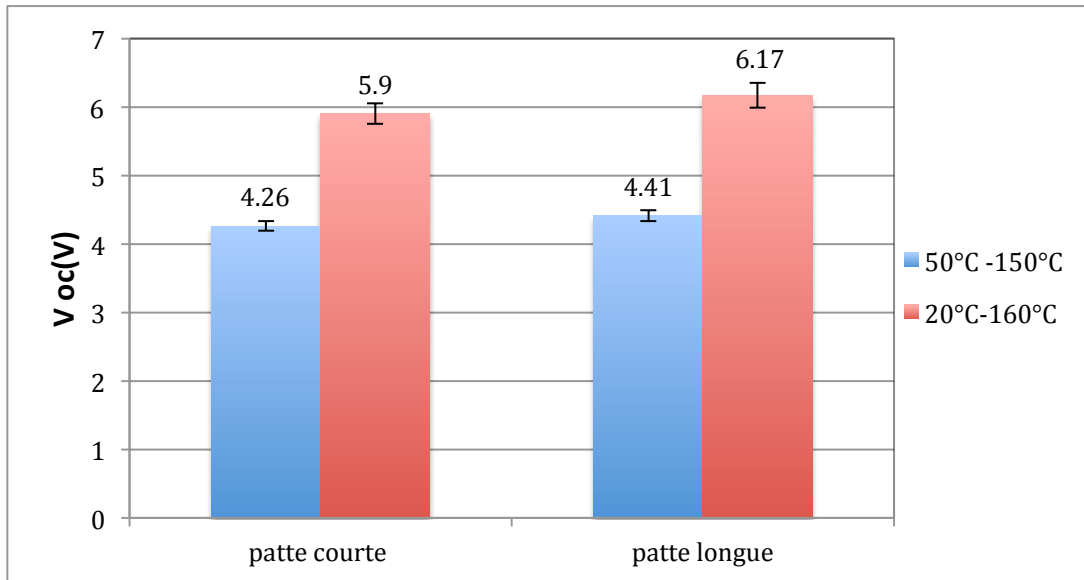


Figure 5-12: Variation de la tension à circuit ouvert en fonction de la longueur des pattes du MTE et de la différence de température

Nous constatons que, pour une même différence de température, la tension en circuit ouvert est plus importante dans le cas des modules à pattes longues. On note une différence de 8% entre les deux catégories de modules pour la gamme de température 20°C-160°C, et une différence de 5% pour la gamme de température 50°C-150°C. L'écart dans la valeur de V_{oc} entre les deux catégories de modules est plus grand quand la différence de température est plus élevée.

Cet écart peut s'expliquer si on se réfère au modèle «réaliste» adopté dans cette étude, plus spécifiquement à l'équation 2.25 :

$$V_{oc} = \frac{N\alpha_{pn}(T_H - T_C)}{(1 + 2r\frac{l_c}{l})}$$

En combinant l'équation 2.25 avec l'équation 2.22, on peut écrire :

$$V_{oc} = N\alpha_{pn}\Delta T_0 \quad (\text{équation 5.7})$$

Ainsi, il est clair que la tension en circuit ouvert est proportionnelle à la différence de température à travers les jonctions $\Delta T_0 (T_{H1} - T_{C1})$ sur la figure 5-11). Or, nous avons démontré à la section précédente que la valeur de ΔT_0 est affectée par la longueur des pattes du module. Les

modules à pattes courtes sont plus affectés par la présence de la céramique, ce qui implique que leur différence de température effective ΔT_0 est plus faible et donc, les valeurs de V_{OC} sont plus faibles pour cette catégorie de modules. On note une augmentation de 3.46% à la valeur de V_{OC} pour une augmentation de 33% de la longueur des pattes (augmentation de 0.78% de ΔT_0) à $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$, et une augmentation de 4.5% à la valeur de V_{OC} pour une augmentation de 33% de la longueur des pattes (augmentation de 0.73% de ΔT_0) à $T_C=20^\circ\text{C}$ et $T_H=160^\circ\text{C}$.

5.1.3.4 Puissance électrique maximale et efficacité de conversion

La puissance électrique d'un module TE est calculée comme le produit courant-tension à partir des valeurs mesurées par le régulateur électronique de charge. La puissance maximale P_{MAX} correspond à la plus grande valeur de la puissance qu'on détermine sur la caractéristique courant-puissance enregistrée lors d'un test effectuée avec les mêmes valeurs de T_H et T_C . Cette valeur sert à la détermination de l'efficacité de conversion η du MTE via l'équation 2.14.

La figure 5-13 représente une comparaison de la puissance maximale entre les modules à pattes longues et les modules à pattes courtes pour deux différences de température.

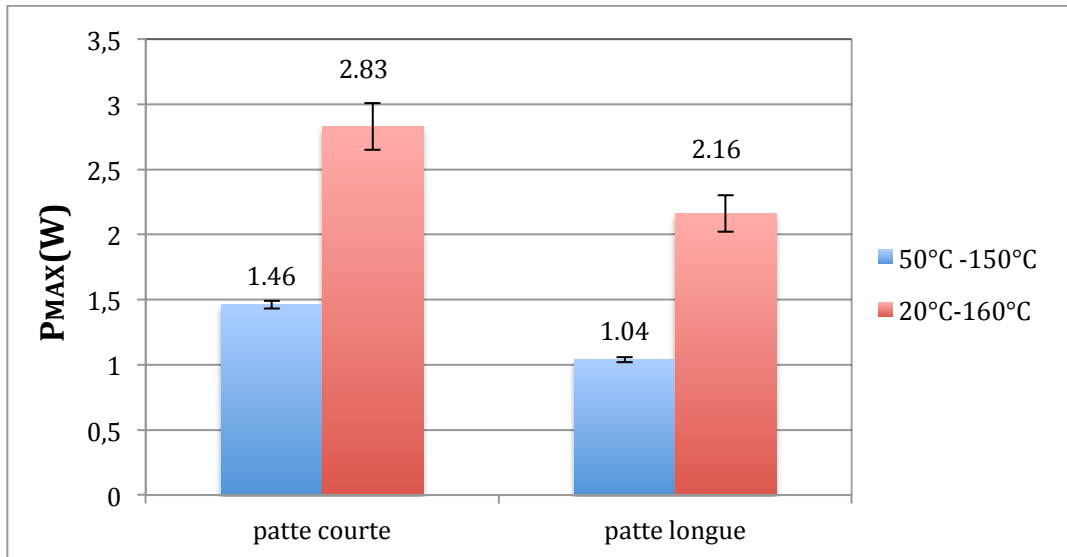


Figure 5-13: Variation de la puissance maximale en fonction de la longueur des pattes du MTE et de la différence de température

Nous remarquons que la puissance maximale du MTE est plus grande dans le cas des modules à pattes courtes. Ceci vient suite à la diminution de la résistance électrique interne du MTE avec la diminution de la longueur des pattes du MTE. Pour une augmentation de 33% de la longueur des pattes, il y a une baisse de 28% de la puissance maximale pour $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$ et une baisse de 23% de la puissance maximale pour $T_C=20^\circ\text{C}$ et $T_H=160^\circ\text{C}$ (même comportement observé avec le courant en 5.1.3.1).

Par ailleurs, d'après l'équation 2.27, nous avons démontré que la puissance maximale est proportionnelle à la différence de température à travers les pattes du module au carré $(\Delta T_0)^2$:

$$P_{Max} = \frac{N\alpha_{pn}^2 A \Delta T_0^2}{4\rho_{pn} l (1 + n \frac{l_c}{l})} \quad (\text{équation 5.8})$$

À partir des histogrammes de la figure 5-13, nous avons calculé le rapport des puissances entre les deux différences de température étudiées pour les deux catégories des modules caractérisés. Les résultats sont regroupés dans le tableau 5-4.

Tableau 5-4 : Rapport des puissances entre deux différences de température

	$P_{Max}(140^\circ\text{C})/P_{Max}(100^\circ\text{C})$	$[\Delta T_0(140^\circ\text{C})/\Delta T_0(100^\circ\text{C})]^2$
MTE à pattes courtes	1.93	1.95
MTE pattes longues	2.07	1.96

Nous remarquons que le rapport des puissances mesurées concorde, en dedans des incertitudes de mesure, avec le rapport des différences de température au carré, ce qui permet de confirmer les mesures de la puissance maximale effectuées.

Quant à l'efficacité de conversion du MTE (figure 5-14), elle suit un comportement inverse à celui de la puissance maximale.

En effet, il existe deux notions relatives à l'efficacité de conversion du module :

- L'efficacité de conversion maximale η_{Max} qui représente la valeur maximale de l'efficacité enregistrée lors d'un test pour une même différence de température et qui est déterminée via l'équation 2.14.

- L'efficacité à puissance maximale η_{PM} qui représente l'efficacité obtenue quand le courant correspond à la puissance maximale.

Nous avons déterminé pour chaque MTE les valeurs de η_{Max} et η_{PM} , qui sont regroupées dans l'annexe D. Ceci a permis de voir que l'efficacité à puissance maximale ne correspond pas avec le maximum d'efficacité produite par le module.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de l'efficacité maximale en fonction de la différence de température et la longueur des pattes du MTE. Notons que la tendance sera la même pour l'efficacité à puissance maximale.

Nous remarquons d'après la figure 5-14 que la variabilité entre les modules qui est traduite par les barres d'erreur est de l'ordre de 7 à 14% pour les modules à pattes longues. Ceci est la composition des deux erreurs (puissance et flux de chaleur). L'efficacité est directement liée aux mesures du flux de chaleur qui peut présenter une imprécision de l'ordre de 2.8% et aux erreurs de la puissance (variabilité de l'ordre de 10%).

L'efficacité maximale est plus élevée dans le cas des modules à pattes longues pour les deux gammes de température étudiées. En effet, nous savons que l'efficacité de conversion du MTE dépend essentiellement de la figure de mérite du matériau (ZT) et de la différence de température imposée aux surfaces du module. Comme le matériau composant les deux catégories de module est le même, l'efficacité de conversion des MTE va dépendre fortement de la différence de température. Et comme il a été confirmé dans la section 5.1.3.3, la différence de température effective ΔT_0 traversant les pattes est plus élevée dans le cas des modules à pattes longues, ce qui implique que l'efficacité de conversion sera plus élevée pour cette catégorie de modules. Une augmentation de 0.78% de la valeur de ΔT_0 pour $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$ a engendré une augmentation de 17.87% à l'efficacité maximale.

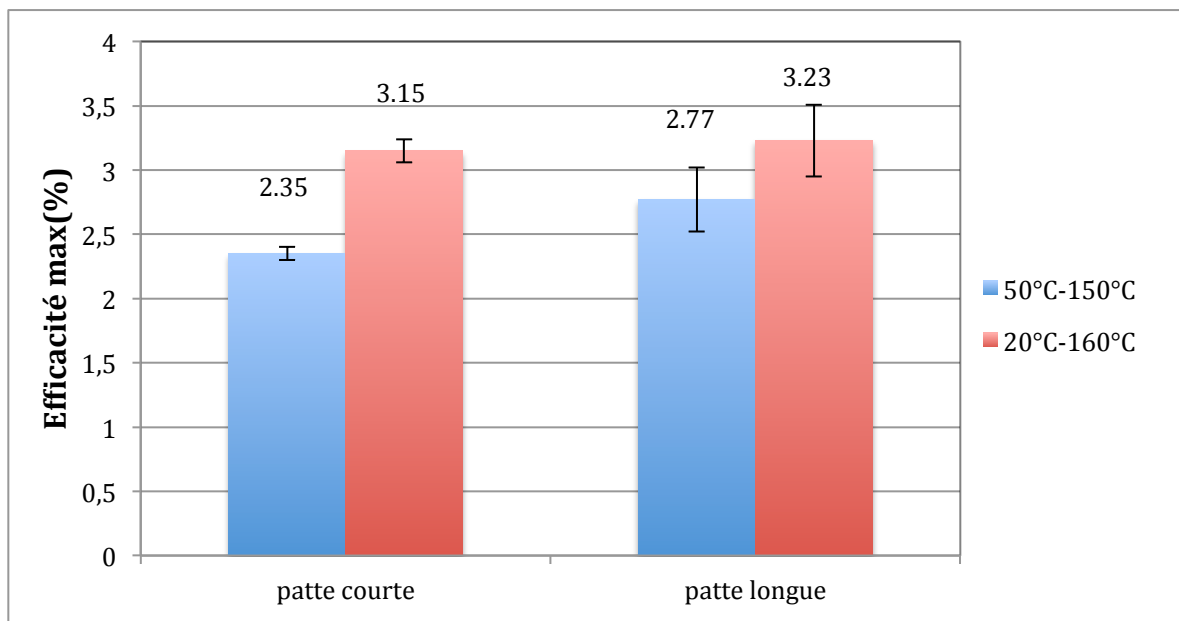


Figure 5-14: Variation de l'efficacité en fonction de la longueur des pattes du MTE et de la différence de température

Par conséquent, la puissance maximale et l'efficacité de conversion du MTE dépendent de la géométrie du module. Si on vise une efficacité élevée, il faut avoir des modules ayant des pattes longues, et si on vise une puissance maximale, il faut avoir des modules avec des pattes courtes. Ainsi, il est important de choisir la géométrie du MTE afin d'obtenir une efficacité ainsi qu'une puissance maximale en fonction de l'application envisagée, ou simplement trouver un compromis entre ces deux paramètres. Dans ce contexte, l'efficacité à puissance maximale constitue un bon compromis pour une application visant une puissance et une efficacité de conversion élevées.

Cette comparaison a été abordée dans la littérature [36] où les auteurs ont démontré que la puissance maximale et l'efficacité maximale varient inversement avec la longueur des pattes (figure 5-15). L'efficacité augmente avec la longueur des pattes jusqu'à atteindre un plateau.

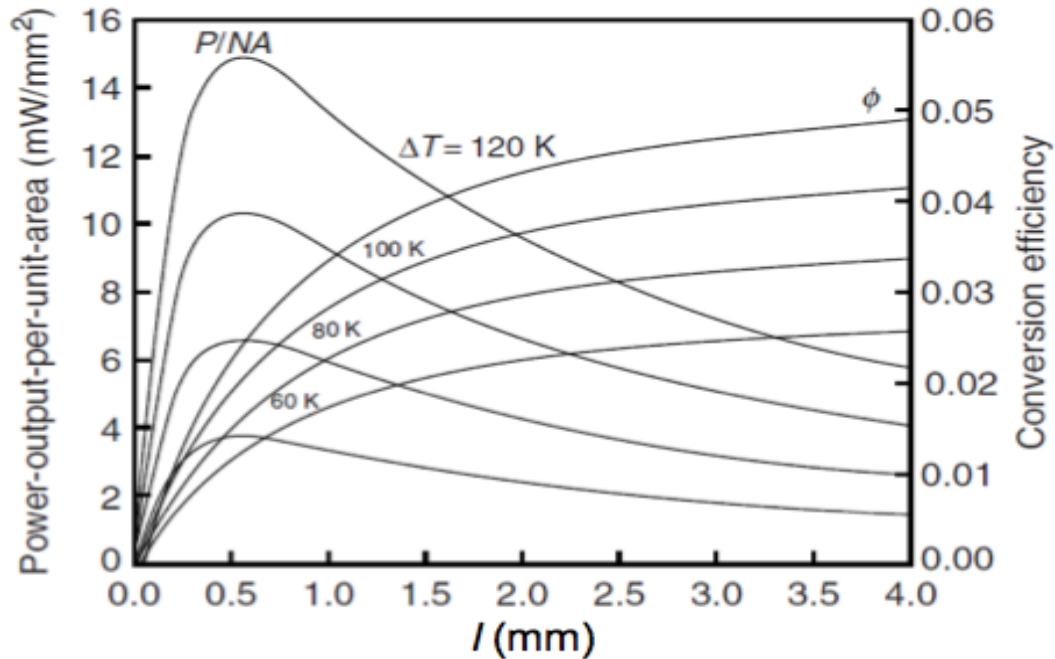


Figure 5-15: Variation de la puissance générée P/NA et l'efficacité de conversion d'un MTE ϕ en fonction de la longueur des pattes [36]

Pour aller plus loin, on peut démontrer que pour deux MTE possédant la même longueur de patte et le même ZT du matériau TE, celui qui possède la conductivité électrique la plus élevée générera une puissance maximale plus grande que l'autre MTE, et celui qui possède une conductivité thermique plus élevée, aura une efficacité de conversion plus importante [36].

5.1.4 Comparaison avec les données de la fiche technique du fabricant

Nous avons à notre disposition la fiche technique des modules appartenant au «lot 1» (voir tableau 5-5) fournie par la compagnie Kryotherm qui a fabriqué les MTE à partir des matériaux élaborés à l'ÉPM. Cette fiche technique correspond à des modules ayant subi un procédé de fabrication identique aux modules étudiés dans ce mémoire, sauf pour la nature des alliages thermoélectriques.

Nous avons caractérisé chacun des trois modules appartenant à ce lot (voir tableau annexe 1), puis nous avons fait la moyenne sur les valeurs de P_{MAX} , de la tension à P_{MAX} , du courant à P_{MAX} ainsi que l'efficacité maximale (tableau 5-5) pour la même différence de température que celle utilisée par le fabricant $T_C = 50^\circ\text{C}$ et $T_H = 150^\circ\text{C}$.

Notons que les incertitudes présentées dans les valeurs expérimentales du tableau 5-5 représentent la variabilité des modules du même lot.

Tableau 5-5: Comparaison entre les données du fabricant et les valeurs obtenues au laboratoire de thermoélectricité de l'ÉPM pour les trois modules du «lot 1»

Paramètre	Fabricant Kryotherm	Laboratoire de thermoélectricité à l'ÉPM
V_{PMAX} (V)	2.25	2.43 ± 0.05
I_{PMAX} (A)	0.9	0.6 ± 0.01
P_{MAX} (W)	2.06	1.46 ± 0.03
η_{MAX} (%)	2.8	2.35 ± 0.05

Nous constatons une grande différence (de l'ordre de 40%) dans les valeurs du courant et de la puissance maximale entre les données fournies par Kryotherm et les résultats obtenus dans notre laboratoire. Cette différence est beaucoup plus large que la variabilité entre les modules et peut avoir plusieurs origines. Premièrement, la compagnie Kryotherm ne donne pas d'information sur l'équipement de mesure qu'elle utilise pour caractériser les MTE. Toutefois, leur système de mesure ne peut pas être identique à notre système, ceci pouvant générer une source d'écart dans les résultats obtenus. Un écart de 20% dans les valeurs de l'efficacité maximale pourrait être conséquence de l'inexactitude de la mesure (le flux de chaleur ne peut pas être mesuré avec exactitude), mais évidemment, un écart de 40% dans les valeurs du courant et de la puissance des modules identiques devient énorme. Pour cela, il est important de préciser que Kryotherm ne donne pas les résultats des tests effectués sur nos modules (fabriqués par des matériaux élaborés à l'ÉPM) mais sur d'autres modules qui possèdent les mêmes dimensions et qui sont fabriqués de la même façon que nos MTE. Ainsi, leurs modules ne contiennent pas la même composition des matériaux que les nôtres.

À la lumière des résultats obtenus (tableau 5-5), nous estimons que la différence observée est due au comportement thermoélectrique des matériaux, à partir desquels nos modules sont fabriqués, qui sont différents de ceux utilisés pour les modules de Kryotherm. Nous soupçonnons alors que nos matériaux $((\text{Bi}, \text{Sb})_2 (\text{Te}, \text{Se})_3)$ sont moins dopés, c'est pourquoi il ont une plus

forte influence sur la résistivité électrique (courant électrique et puissance plus faibles) et moins d'influence sur le coefficient de Seebeck qui est directement lié au voltage (équation 2.1). En effet, le dopage d'un semi conducteur augmente sa conductivité électrique et diminue son coefficient de Seebeck (voir figure 5-16). Ceci peut expliquer la raison pour laquelle nos modules présentent un voltage plus élevée et un courant électrique et une puissance plus faibles que ceux de Kryotherm. Notons que le choix de l'échelle de dopage sur la figure 5-16 est arbitraire, et cette figure ne correspond pas nécessairement aux alliages à base de tellure de bismuth.

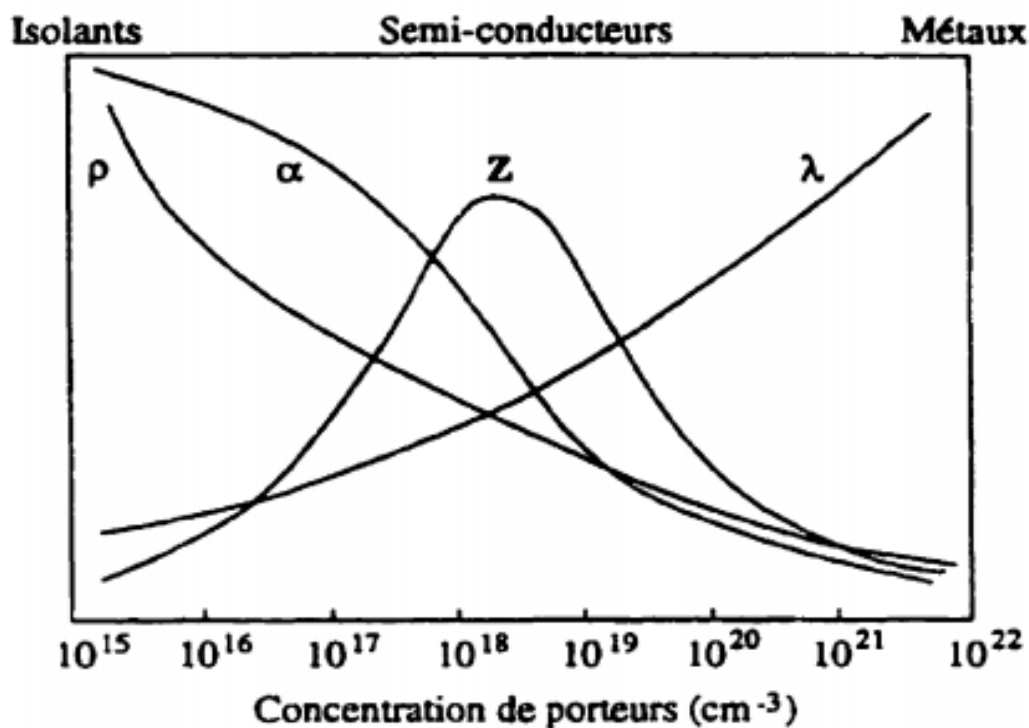


Figure 5-16: Variation schématique des propriétés thermoélectriques des matériaux en fonction de la concentration des porteurs de charge [37]

La validation du système de mesure par le moyen de la comparaison des données du fabricant avec les données expérimentales n'a pas abouti étant donné le manque d'informations fournies par la compagnie de fabrication de ces modules. Nous expliquerons dans la prochaine section la procédure suivie pour valider nos mesures.

5.1.5 Validation du système de mesure

Il n'était pas possible de faire des comparaisons avec un module déjà connu étant donné la dissemblance dans les systèmes de mesure présents dans les laboratoires de recherche. Jusqu'à aujourd'hui, il n'existe pas de standard pour ces systèmes de mesure et on n'est pas certain de l'exactitude donnée par chaque système. La performance TE obtenue par l'utilisateur est souvent plus mauvaise ou meilleure que celle proposée par le fabricant. Ceci constitue encore un problème de la recherche dans ce domaine [26].

Toutefois, nous avons eu recours à une simulation thermoélectrique d'un module pour pouvoir prédire des mesures de V_{OC} , I_{CC} , P_{MAX} , Q_H et η , en utilisant le logiciel «*Ansys Workbench 13.0*» [38]. Ce logiciel permet de modéliser un module TE en ayant choisi ses dimensions ainsi que les propriétés TE des matériaux le constituant. Pour cela, il faut remplir plusieurs sections sur le logiciel pour définir les paramètres d'entrée. Il faut commencer par les données des matériaux où il est possible de créer un matériau personnalisé, choisir un matériau prédéfini ou encore créer une bibliothèque. Ensuite, il faut créer la géométrie du module à adopter (dimension et longueur de pattes) à l'aide du «*Design Modeler*», en tenant compte de la présence de deux plaques de céramique et des conducteurs de cuivre entre les pattes et en créant le circuit électrique du module.

Pour obtenir les paramètres TE à mesurer, Ansys simule le passage du courant électrique à travers le module et impose une condition du courant à l'extrémité du circuit. Des conditions thermiques sont aussi imposées aux deux surfaces du module (température chaude et température froide) afin de créer un gradient de température à travers ce dernier. À l'une des extrémités du circuit électrique, une tension de mise à la terre est appliquée pour pouvoir quantifier le potentiel généré. Des résultats pertinents à notre analyse sont générés comme le courant, la tension, la température et le flux de chaleur.

Nous avons réalisé des simulations pour un module appartenant au «lot 2» qu'on nommera désormais MTE-2-simulé. Ce module est composé de matériaux à base de $(Bi, Sb)_2$ $(Te, Se)_3$ (de type p et de type n) appelés P1416 et N1560 et dans la bibliothèque du logiciel Ansys. Les simulations ont été réalisées pour des températures $T_C=50^\circ C$ et $T_H=150^\circ C$. Une comparaison a été faite entre le module MTE-2-simulé et les résultats expérimentaux provenant des modules du «lot 2» dans les mêmes conditions thermiques (tableau 5-6).

Tableau 5-6: Comparaison des résultats expérimentaux de la moyenne des modules de MTE-2-1 jusqu'à MTE-2-13 avec le module MTE-2-simulé, à $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$

Paramètre	Résultats simulation	Résultats expérimentaux
I_{CC} (A)	0.9	0.94 ± 0.01
V_{OC} (V)	4.9	4.41 ± 0.08
P_{MAX} (W)	1.38	1.04 ± 0.02
Q_H (W)	46.8	50.47 ± 0.75
η_{Max} (%)	2.94	2.77 ± 0.25

Les résultats expérimentaux figurant dans ce tableau représentent la moyenne faite sur tous les modules appartenant au «lot 2», les incertitudes représentent les variabilités entre les modules.

On observe d'après ce tableau que les mesures effectuées par le système du laboratoire de thermoélectricité sont proches du modèle théorique, le même ordre de grandeur est presque conservé pour les deux types de résultats.

Nous remarquons aussi que le système de mesure surévalue légèrement le flux de chaleur qui traverse le module, on note un écart de l'ordre de 7% entre les deux résultats. Cet écart dépasse l'incertitude produite par la variabilité entre les modules et la précision des mesures du flux de chaleur (2.8%). Ainsi, on pourrait soupçonner qu'il existe des pertes de chaleur parasites qui s'échappent des bords du module. Pour cela, nous avons caractérisé le module MTE-1.5-1 deux fois de suite : le premier test est mené en ayant protégé les bords du module avec un ruban thermique adhésif, et le 2^{ème} test est mené en ayant retiré ce ruban, à une différence de température $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$ et une pression de serrage de 1.2 MPa. La valeur de V_{OC} varie peu entre les deux mesures, elle passe de $V_{OC}=4.3 \text{ V} \pm 0.18\%$ à $V_{OC}=4.27 \text{ V} \pm 0.21\%$, une différence de 0.7% entre les deux valeurs et qui se situe dans l'intervalle de précision des mesure de V_{OC} . Pour la valeur de I_{CC} , il y a aussi une légère variation, elle passe de $I_{CC}=1.37 \pm 0.16\%$ à $I_{CC}=1.35 \pm 0.18\%$, une différence de l'ordre de 1.4%. Ceci confirme que les pertes sur les bords du module sont minimales et n'affectent pas énormément les résultats obtenus. Ainsi, les résultats présentés dans cette sous-section permettent de confirmer la validité des mesures.

En conclusion, il a été démontré dans cette partie que le système de mesure des MTE nous a permis de caractériser un module TE en mesurant les valeurs de V_{OC} , I_{CC} , et P_{MAX} à partir des caractéristiques courant-tension et courant-puissance. Il a été possible de quantifier le flux de chaleur Q_H en utilisant les thermocouples et d'en déduire la valeur de l'efficacité de conversion η .

L'étude de l'influence de la pression mécanique sur les modules a prouvé que la puissance maximale générée par le module augmente avec l'augmentation de la pression appliquée jusqu'à arriver à saturation. La valeur de la pression nécessaire pour assurer la reproductibilité des mesures est de 1.2 MPa.

La caractérisation des modules à deux différentes longueurs de pattes nous a permis de confirmer que la géométrie des modules et les résistances électriques et thermiques influent sur sa performance. Cette étude nous a révélé aussi qu'il existe des différences dans la réponse TE des modules appartenant à un même lot. Ces différences sont à l'origine des incertitudes cumulées par les procédés de fabrication. Dans les prochaines sections, nous allons présenter la caractérisation de plusieurs modules dans le système d'assemblage des MTE.

5.2 Caractérisation d'un assemblage de modules TE

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats des mesures faites par le système d'assemblage de plusieurs modules TE introduit à la section 4.2. Il est intéressant d'étudier le comportement de plusieurs modules en série ou en parallèle électriquement afin d'étudier l'effet de cet assemblage sur la performance générée et explorer d'autres applications possibles.

Tout d'abord, nous allons présenter le choix des conditions de mesure. Puis, nous allons établir le contrôle du système de mesure en étudiant l'influence de la position du MTE sur sa performance. Ensuite, nous allons discuter de l'effet de la pression mécanique sur la performance des modules où nous allons présenter une méthode pour la calculer. Enfin, nous allons exposer la performance des assemblages des MTE en série et en parallèle.

Nous verrons au cours de cette section que le système d'assemblage des MTE présente certaines limitations.

5.2.1 Évaluation des paramètres TE d'un assemblage de modules

5.2.1.1 Choix des conditions de mesure

Avant de commencer les mesures, il est important d'imposer des conditions essentielles dans la réussite des tests à effectuer. Le choix de V_{MAX} , I_{MAX} , ΔI et Δt se fait comme pour l'autre système de mesure (5.1.1.1). Il faut donc déterminer la valeur de Δt appropriée pour ce système de mesure. Rappelons que le temps de stabilisation Δt est la durée de temps nécessaire pour qu'une étape de mesure soit achevée. Chaque étape de mesure correspond à un point sur la caractéristique I-V.

Pour cela, nous avons effectué des mesures sur le module MTE-1.5-1A à différentes valeurs de Δt , pour la même différence de température et la même pression de serrage. Puis, nous avons relevé pour chaque mesure les valeurs de I_{CC} . Les résultats obtenus sont regroupés dans la figure 5-17 où on suit l'évolution de I_{CC} en fonction du temps de stabilisation Δt .

Les quantités qui entrent en jeu lors de la stabilisation sont les mêmes que pour l'autre système de mesure (voir figure 5-5).

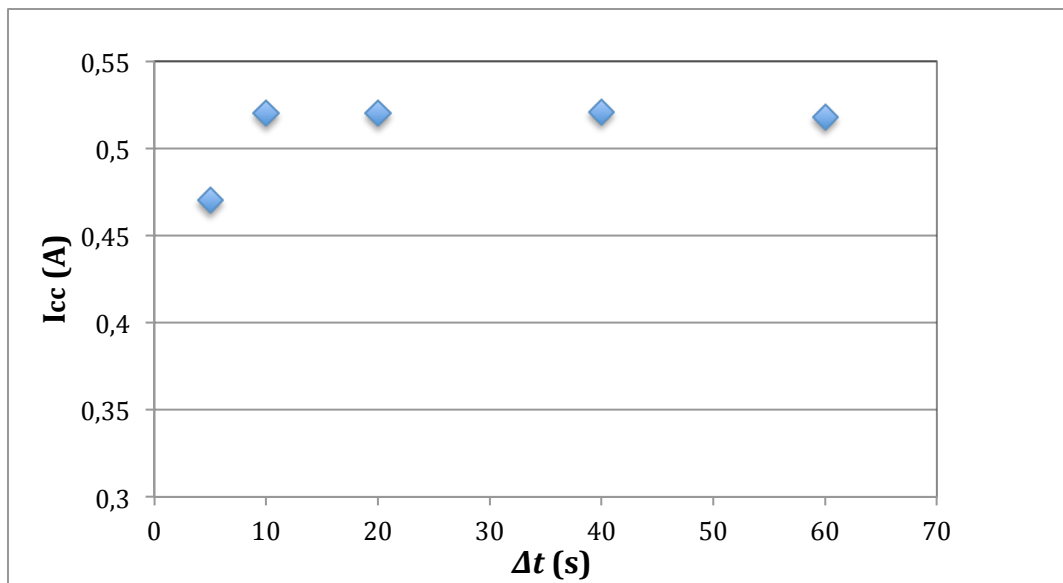


Figure 5-17: Évolution de I_{CC} en fonction du temps de stabilisation Δt pour le module MTE-1.5-1A dans le système d'assemblage

L'influence de l'effet Peltier sur le changement de la température (discuté en 5.1.1.1) n'a pas le même effet sur le système d'assemblage des MTE étant donné que ce dernier met plus de

temps pour varier la température chaude ou froide. Ceci remonte à la géométrie de ce système, pour qui les blocs chaud et froid sont plus grands, et donc l'inertie thermique est plus difficile à atteindre. Jusqu'à $\Delta t=40s$, l'effet Peltier n'affecte pas les mesures. Toutefois, nous avons décidé de mener les mesures à $\Delta t=10s$ pour une question de gain du temps. Pour $\Delta t < 10s$, nous remarquons que les mesures de I_{CC} sont sous-estimées étant donné que le temps est trop court pour que le système physique atteigne la valeur exacte d'un point de la courbe I-V.

5.2.1.2 Test de reproductibilité

Il est important de tester la reproductibilité des mesures effectuées dans le système d'assemblage des MTE. Pour cela, nous avons mené deux tests successifs sur deux modules TE, séparément. Les deux modules ont été placés côte à côte. Ces modules ont été mesurés à deux reprises dans les mêmes conditions (différence de température et pression) en les ayant démonté puis remonté une 2^{ème} fois toujours dans le même endroit. Nous avons relevé les valeurs de V_{OC} obtenues pour le module MTE-1.5-1A à $T_C=50^\circ C$ et $T_H=150^\circ C$, et pour le module MTE-1.5-2A à $T_C=30^\circ C$ et $T_H=130^\circ C$ (figure 5-18), mesurés individuellement.

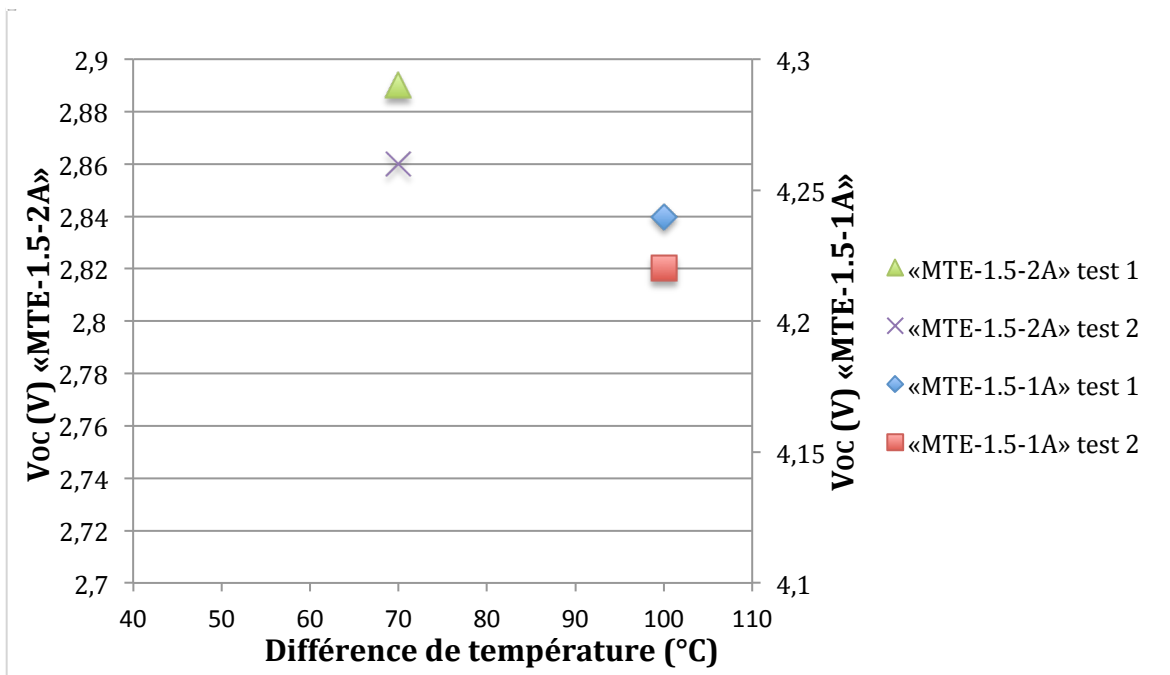


Figure 5-18: Test de reproductibilité des modules dans le système d'assemblage des MTE

L'écart entre les deux mesures effectuées sur le module MTE-1.5-1A est de 0.47%. Pour le module MTE-1.5-2A, la différence est évaluée à 1.04%.

Nous remarquons que les écarts obtenus pour les deux modules sont plus élevés dans le cas du système d'assemblage des MTE que dans le système de mesure des MTE (voir section 5.1.1.2). Ceci peut s'expliquer par la différence de l'architecture des deux systèmes même si le principe de mesure reste inchangé, mais laisse penser qu'il existe d'autres facteurs influant cette différence que nous allons présenter durant les prochaines sections.

5.2.2 Influence de la position du module TE sur sa performance

Le système d'assemblage des MTE peut contenir jusqu'à dix modules côte à côte sur un seul étage comme on peut le voir sur la figure 5-19, où les modules sont numérotés de 1 à 10 et les positions des thermocouples sont représentées par des cercles bleus et numérotées de 1 à 5.

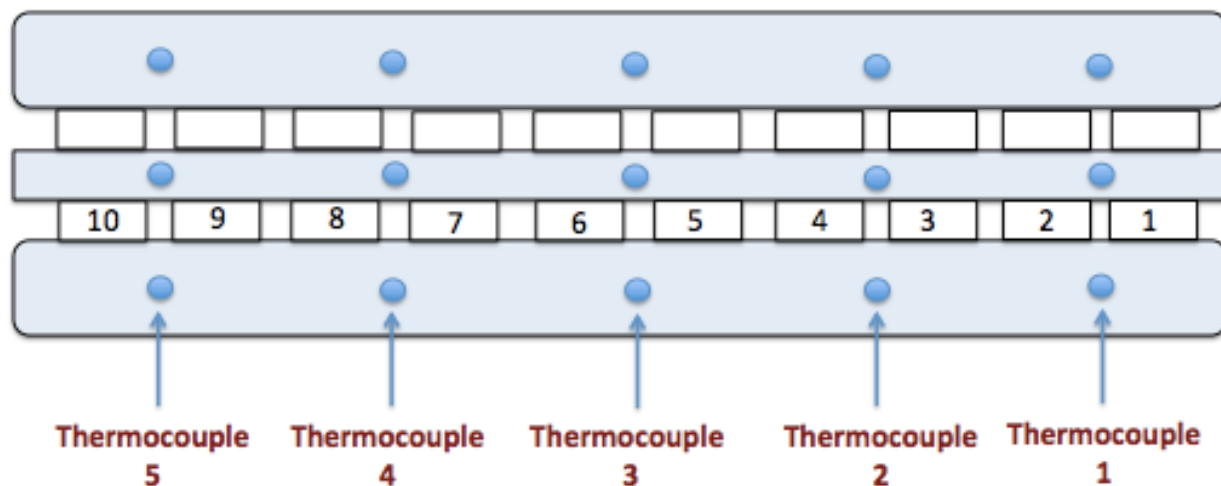


Figure 5-19: Positions schématiques des modules et des thermocouples dans le système d'assemblage des MTE

Nous avons décidé de déterminer la valeur de V_{OC} pour le module MTE-1.5-1A en l'ayant placé une fois dans la position 1, puis dans la position 5, en imposant la même différence de température ($T_C = 50^\circ\text{C}$ et $T_H = 150^\circ\text{C}$) et la même pression de serrage (1.2 MPa) pour les deux tests. Le module a été mesuré deux fois de suite dans la même position pour évaluer les incertitudes, indiquées dans le tableau 5-7.

Tableau 5-7: Valeurs de V_{OC} pour le module MTE-1.5-1A mesuré à deux différentes positions dans le système d'assemblage des modules

Position du module	V_{OC} (V)
1	4.23 ± 0.01
5	4.31 ± 0.012

Les résultats du tableau 5-7 montrent que les valeurs de V_{OC} pour un même module mesuré dans deux différentes positions du système d'assemblage ne sont pas identiques. L'écart dans les deux valeurs est évalué à 1.9%. Étant donné que V_{OC} est directement liée à la différence de température, ceci laisse penser que la différence de température imposée aux surfaces du module n'est pas la même pour les deux positions étudiées.

Pour cela, nous avons décidé de mesurer simultanément la température dans un bloc grâce aux différentes positions de thermocouples (figure 5-19). Habituellement, quand on fait nos mesures, les thermocouples qui indiquent la température des blocs froid et chaud sont placés à la position 3 (au milieu du bloc), c'est le thermocouple qui donne la valeur de contrôle (set-point).

Tout d'abord, nous avons fixé la température du bloc chaud à 150°C par le thermocouple de contrôle (thermocouple à la position 3), puis nous avons inséré un 2^{ème} thermocouple tour à tour dans les quatre positions restantes, en notant à chaque fois la température mesurée. Par la suite, nous avons fait de même pour le bloc froid en ayant fixé sa température à 50°C, et nous avons illustré les résultats sur la figure 5-20.

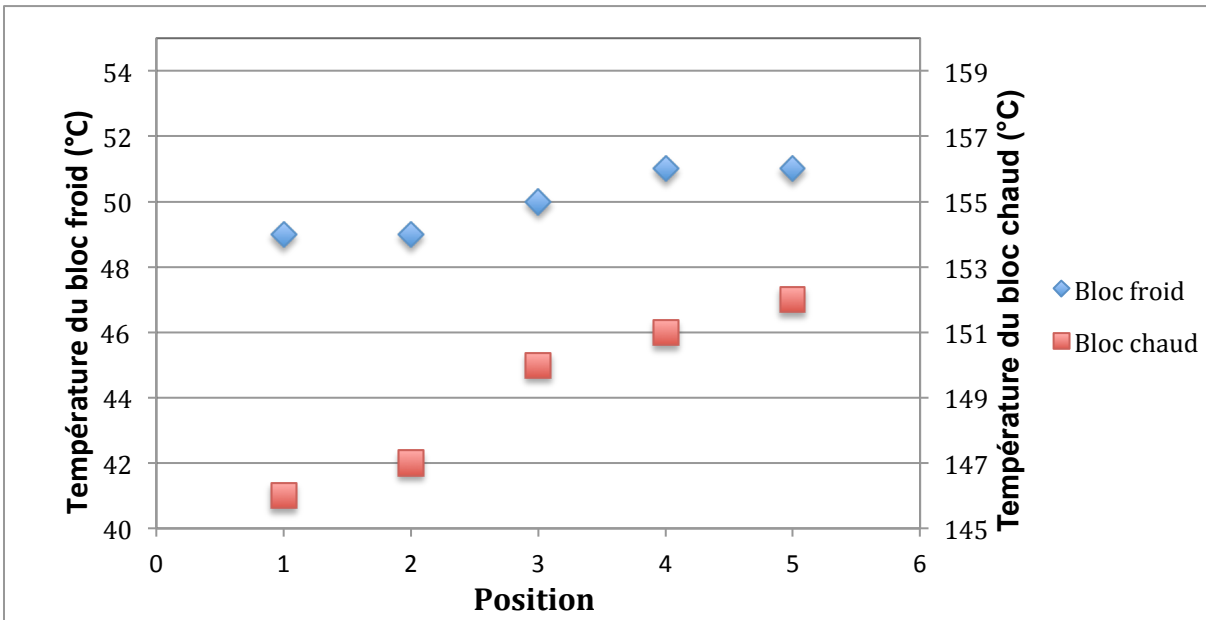


Figure 5-20: Distribution de la température le long des blocs chaud et froid quand le contrôle de la température est effectué par l'intermédiaire du thermocouple placé dans la position 3

Il est clair d'après cette figure que la distribution de la température dans les blocs du système d'assemblage des MTE n'est pas uniforme. La variation est plus importante dans le bloc chaud, c'est à dire quand la température est plus élevée, il y a plus de risque qu'elle varie le long du bloc. Ceci entraîne une dissemblance dans la quantité du flux de chaleur qui traverse les modules sur un même étage (un écart de 4% sur la différence de température entre les positions 1 et 5 du module), et explique les écarts trouvés (1.9%) quand on mesure le même module à deux différentes positions dans le système d'assemblage.

5.2.3 Étude de la pression mécanique

Nous avons déjà discuté de l'importance de la pression appliquée sur les modules afin de produire une puissance maximale plus élevée, en ayant eu recours au système de mesure des MTE. Maintenant, il serait intéressant de savoir si la pression a le même effet sur des modules mesurés dans le système d'assemblage de plusieurs MTE.

Le système d'assemblage de plusieurs modules n'est pas équipé d'une cellule de charge pour évaluer la force de serrage qu'on applique sur les deux rondelles de contrôle de la charge

mécanique (figure 4-9). Pour cela, nous avons utilisé une approche mécanique qui sera décrite en détail dans ce qui suit.

5.2.3.1 Méthode de calcul de la pression mécanique

On sait que les deux rondelles de pression qui se trouvent dans le système d'assemblage des MTE sont munies chacune d'une vis qui, une fois tournée, sert à appliquer une force de serrage sur les modules disposés côte à côte. Le but de cette étude est alors l'évaluation de la force de pré-charge F_0 , qui est la force qui met les pièces en pression lors du serrage de la vis.

Pour ce faire, il faut tout d'abord déterminer la classe de résistance mécanique de la vis utilisée dans le système de mesure. En effet, dans chaque classe de résistance, il existe une valeur du couple de serrage C_s qui correspond à une valeur de la force de pré-charge F_0 .

Le couple de serrage représente une force appliquée au bout d'un bras de levier, et s'exprime comme suit :

$$\text{Couple (N.m)} = \text{force } F \text{ (N)} \times \text{longueur } D \text{ (m)} \quad (\text{équation 5.9})$$

F représente la force qu'on applique pour tourner la vis et D correspond à la longueur du bras de levier.

La suite de la procédure de calcul est détaillée dans l'annexe E. Nous avons regroupé les résultats dans le tableau 5-8.

Tableau 5-8: Calcul de la pression appliquée sur les MTE pour chaque valeur de la force F

F (N)	C_s (N.m)	F_0 (N)	Pression (MPa)
88.9	20.44	7091.27	0.88
133.35	30.67	10605.15	1.32
177.81	40.89	14141.12	1.76

Cette méthode nous a permis de déterminer la pression appliquée sur les modules en partant de la valeur F de la force affichée sur la clé dynamométrique.

5.2.3.2 Influence de la pression mécanique sur la performance des modules TE

Après avoir établi une méthode pour déterminer la pression, nous avons effectué des tests sur les deux modules MTE-1.5-1A (placé à la position 5) et MTE-1.5-2A (placé à la position 6) à

trois différentes valeurs de la pression ($P= 0.88$ MPa, 1.32 MPa et 1.76 MPa) et pour une même différence de température $T_C= 50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$.

La figure 5-21 illustre les deux courbes obtenues pour chaque module. Notons que chaque module a été mesuré séparément.

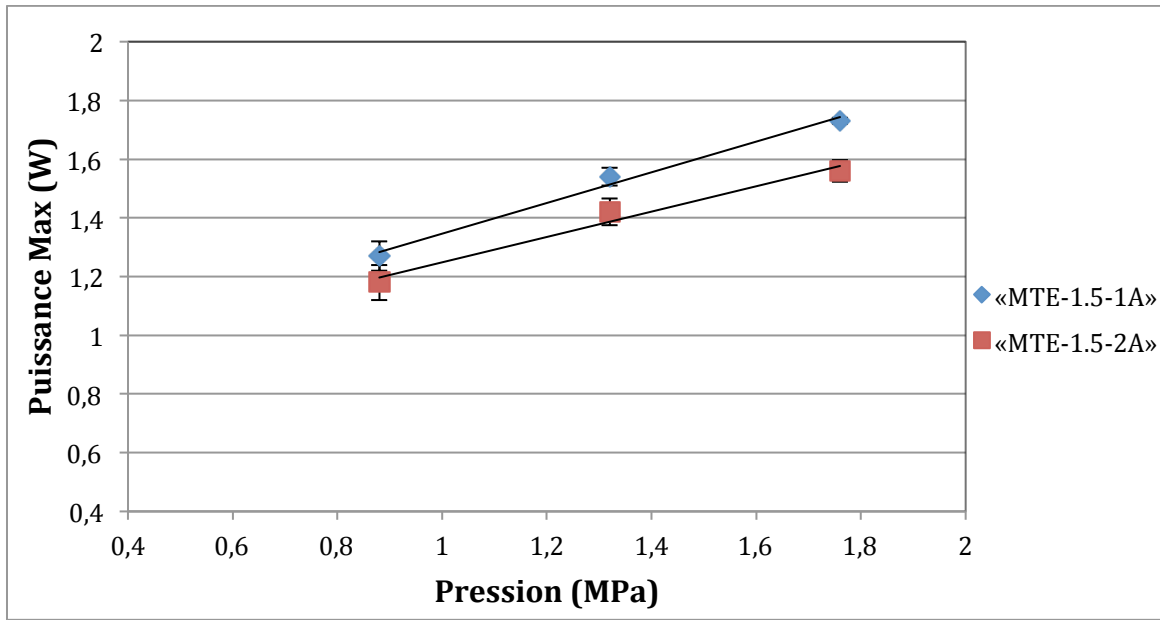


Figure 5-21: Évolution de la puissance maximale en fonction de la pression pour les modules MTE-1.5-1A et MTE-1.5-2A mesurés dans le système d'assemblage des MTE, à $T_C= 50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$

Nous observons la même tendance constatée avec l'autre système de mesure. En effet, la puissance maximale générée augmente au fur et à mesure que la pression augmente, elle passe de $P_{MAX}= 1.27 \pm 0.05$ W (pour $P=0.88$ MPa) à $P_{MAX}=1.73 \pm 0.01$ W (pour $P= 1.76$ MPa) pour le module MTE-1.5-1A. Ainsi la puissance maximale a augmenté de 0.46 W pour une pression qui a augmenté de 0.88 MPa. On s'attend à obtenir un plateau si on augmente encore la pression mécanique. En effet, nous avons décidé de ne pas augmenter encore plus la pression appliquée de peur de détériorer les modules TE, cette manipulation est très soignée dans le cas du système d'assemblage vu qu'il n'est pas muni d'une cellule de charge permettant d'évaluer instantanément la force appliquée sur les modules.

L'explication de l'augmentation de la puissance en fonction de la pression dans le système d'assemblage des MTE est la même que celle proposée en 5.1.2. C'est la diminution de

la résistance thermique de contact qui assure l'augmentation du flux de chaleur traversant le module. Plus le contact entre les modules et le bloc chaud est efficace, plus le flux de chaleur traversant ces modules est important, ce qui implique qu'une quantité plus importante de ce flux sera convertie en puissance électrique.

Toutefois, si on compare la courbe de la figure 5-21 avec celle de la figure 5-8 (pression appliquée sur un seul MTE), nous remarquons qu'une pression de 0.88 MPa était suffisante pour arriver à saturation. Tandis que pour le cas de ce système, on n'arrive toujours pas à une valeur stable. Rappelons que le système d'assemblage est un système en phase expérimentale préliminaire, il semblerait que le fait de ne pas avoir ajouté de la pâte thermique sur les modules combiné avec l'imprécision de l'évaluation de la pression a pu faire la différence avec la tendance des résultats obtenus par l'autre système de mesure.

5.2.4 Performance de l'assemblage des modules TE en série

5.2.4.1 Caractéristiques I-V de l'assemblage des modules TE en série

Parmi les objectifs de ce travail, on cite l'étude de l'assemblage de plusieurs modules en série. Pour cela, nous avons connecté de $n=1$ jusqu'à $n=5$ MTE en série (n représente le nombre de module connectés électriquement ensemble, toujours en parallèle thermiquement) et nous avons fait des mesures sur chaque assemblage (voir le schéma de la figure 4-12 qui représente un circuit équivalent idéalisé de deux modules connectés en série électriquement). Les cinq modules sont placés de la position 3 à la position 7 sur le système. Notons qu'on s'est limité à l'assemblage de cinq modules en série alors qu'un seul étage du système de mesure peut contenir jusqu'à dix modules. La raison est que le logiciel de mesure « Efficacité 2009 » était principalement conçu pour le système de mesure d'un seul MTE, et il n'était pas destiné à recevoir un V_{MAX} supérieur à 20 V. Toutefois, nous avons effectué des mesures sur un assemblage de dix modules en série sans avoir eu recours au logiciel. Ces résultats seront présentés dans la prochaine sous-section.

Les caractéristiques I-V pour des modules du lot 3 (de MTE-1.5-1A jusqu'à MTE-1.5-5A) sont tracées sur la figure 5-22 pour chaque assemblage. On retrouve aussi les équations correspondantes à chaque droite illustrées par la même couleur. Un lissage a été effectué sur les valeurs mesurées (représentées par les symboles) par la méthode des moindres carrés.

Ces équations de la tension en fonction du courant nous permettent de déterminer les valeurs de I_{CC} et V_{OC} pour chaque assemblage.

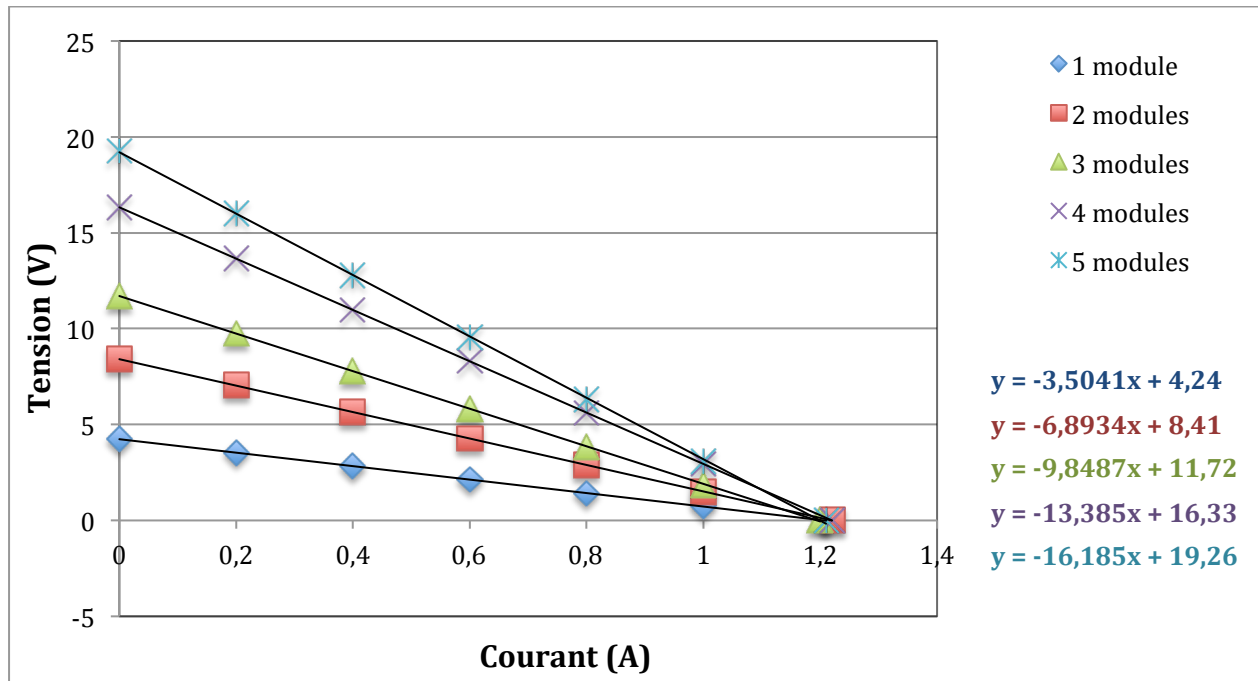


Figure 5-22: Caractéristiques I-V pour des assemblages en série de MTE ($n=1, 2, 3, 4, 5$) à $T_c=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$, à une pression $P=1.76\text{ MPa}$

À première vue, nous remarquons que toutes les droites se joignent en un point caractéristique qui est I_{CC} . En effet, lorsqu'on fait un assemblage de modules en série électriquement, on relie les modules les uns à la suite des autres, par conséquent, le courant n'a qu'un seul chemin pour revenir à sa source, quand la résistance de charge est nulle. C'est pour cette raison que la valeur de I_{CC} ne change pas, théoriquement, au fur et à mesure que l'on ajoute des modules en série. Cependant, si on calcule la valeur de I_{CC} pour chaque assemblage, on trouve que ce paramètre varie légèrement ($I_{CC}=1.2\pm 0.015\text{A}$) (tableau 5-9). Les incertitudes dans ce tableau représentent la reproductibilité des modules.

Tableau 5-9: Valeurs de I_{CC} pour les différents assemblages

Assemblage en série	I_{CC} (A)
1 module	1.21 ± 0.01
2 modules	1.22 ± 0.01
3 modules	1.19 ± 0.01
4 modules	1.22 ± 0.01
5 modules	1.19 ± 0.01

Les faibles écarts dans les valeurs de I_{CC} (inférieures à 3%) soulèvent la question de la variabilité entre les modules déjà discutée en 5.1.3.4. L'autre facteur qui peut affecter ces résultats est l'incertitude des mesures traduite principalement par la précision des mesures du courant par le régulateur électronique de charge évaluée à $\pm 0.1A$.

Nous allons voir dans une prochaine section l'assemblage des MTE en parallèle électriquement.

5.2.4.2 Mesure de l'assemblage des modules TE par un voltmètre

Comme nous l'avons déjà mentionné dans la sous-section précédente, le logiciel «Efficacité 2009» ne permet pas de faire des mesures pour un assemblage au-delà de cinq modules en série. Ainsi, pour pouvoir étudier la réponse TE d'un assemblage de dix modules en série disposés sur un seul étage, nous avons eu recours à l'utilisation du régulateur électronique de charge «B&K *precision* 8500» manuellement. Cette mesure a été complétée par une autre mesure manuelle qui consiste à comparer la valeur de la tension affichée par le régulateur électronique de charge avec la valeur mesurée par un voltmètre de type «*Wavetek* 15XL» (d'impédance d'entrée $10M\Omega$) branché directement aux bornes du module en question (figure 5-23).

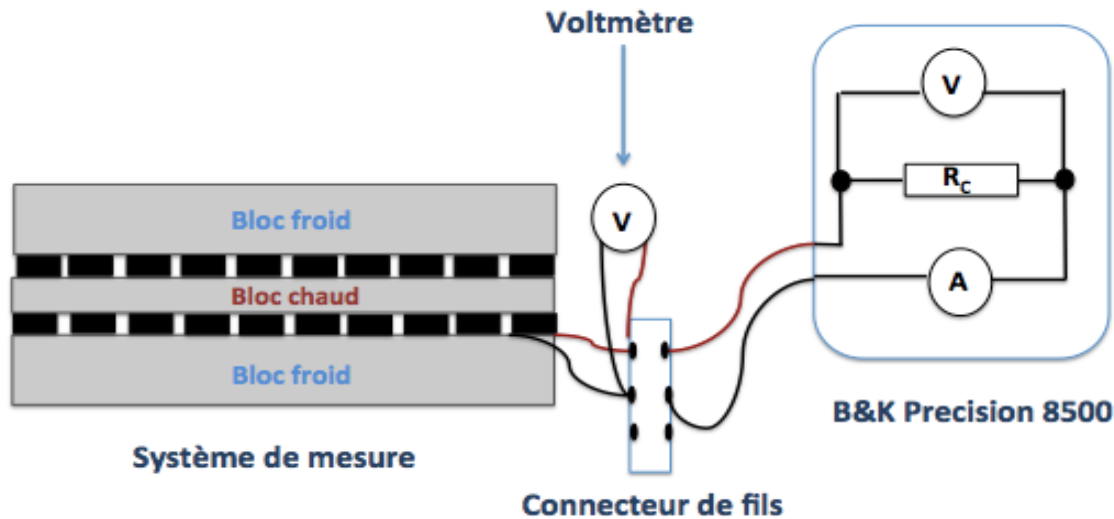


Figure 5-23: Schéma du branchement d'un module TE avec le régulateur électronique de charge «B&K precision 8500» et le voltmètre «Wavetek 15XL»

La figure 5-24 représente deux caractéristiques I-V pour un module TE mesuré dans le système d'assemblage des MTE, une courbe est tracée à partir des valeurs de la tension mesurée par «B&K precision 8500» et l'autre courbe est tracée à partir des valeurs de la tension mesurée par le voltmètre aux bornes du MTE.

D'après la figure 5-24, il existe un léger écart entre les deux courbes qui s'amplifie quand le courant augmente. Nous constatons que les valeurs de la tension mesurée par le voltmètre sont légèrement supérieures à celles mesurées par « B&K precision 8500 » (la résistance interne de l'ampèremètre dans l'appareil «B&K precision 8500» est de 0.035Ω). Ceci laisse penser que le régulateur électronique de charge sous-estime la valeur de la tension. On note la valeur de la résistance électrique interne du module mesurée par le régulateur $R_{B\&K} = 3.36 \Omega$ et celle mesurée par le voltmètre $R_{Vol} = 3.26 \Omega$. Cet écart entre les deux mesures est dû à la résistance électrique des fils qui est plus élevée dans le cas du régulateur électronique de charge car ses fils sont plus longs.

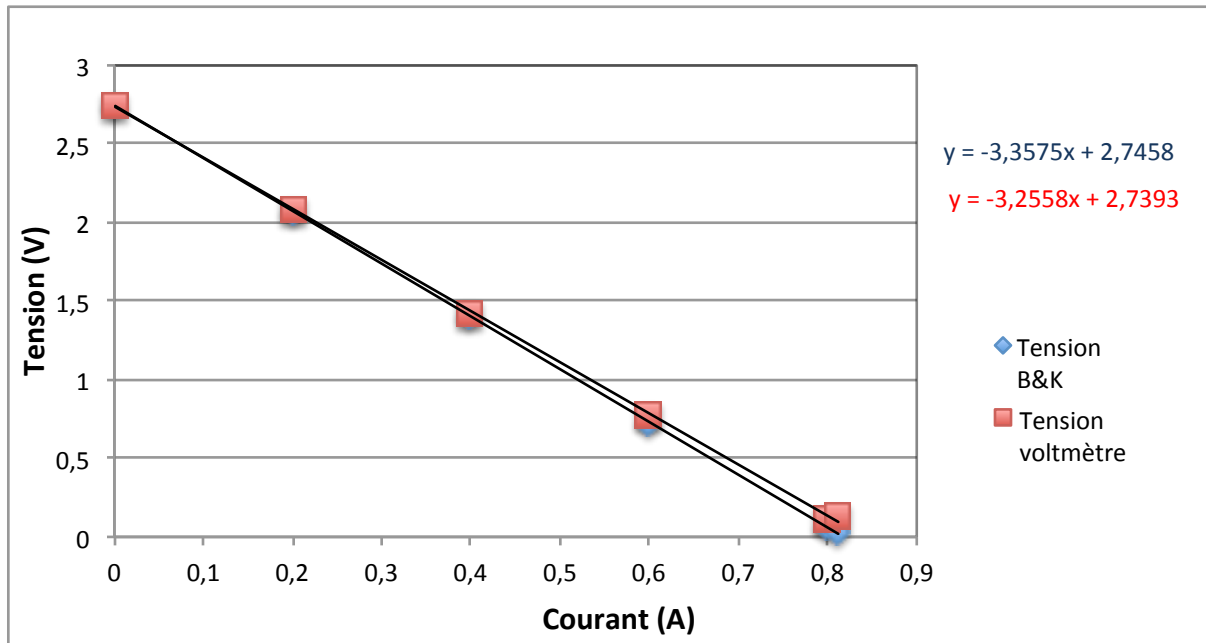


Figure 5-24: Caractéristiques I-V obtenues avec une tension mesurée par «B&K precision 8500» (en bleu) et une tension mesurée par un voltmètre «Wavetek 15XL» (en rouge), dans le système d'assemblage des MTE à $T_C=38^\circ\text{C}$ et $T_H=138^\circ\text{C}$ pour le module MTE-1.5-1A

Nous avons déterminé les résistances internes de plusieurs assemblages de modules en série (de $n=1$ jusqu'à $n=10$) en ayant fait deux tests différents (tension mesurée par le voltmètre et tension mesurée par «B&K precision 8500»). L'écart entre les deux mesures permet d'évaluer la résistance des fils du régulateur électronique de charge. Nous avons fait la moyenne de tous ces écarts calculés par les dix assemblages en série des MTE (voir annexe F) qui est évalué à $0.11 \pm 0.07 \Omega$. Nous remarquons que $R_{B\&K}$ est toujours supérieure à R_{Vol} , ceci confirme que l'écart est dû à la résistance des fils du régulateur électronique de charge. On en conclut que $R_{fils} = 0.11 \Omega$.

Par ailleurs, nous avons caractérisé des assemblages de modules TE appartenant au «lot 3» (ces modules sont connectés de $n=1$ jusqu'à $n=10$ modules en série), en notant la valeur de la tension fournie par le voltmètre, pour $T_C=38^\circ\text{C}$ et $T_H=138^\circ\text{C}$ et à une pression de serrage de 1.76 MPa. La droite obtenue à la figure 5-25 représente un lissage par la méthode de moindres carrés.

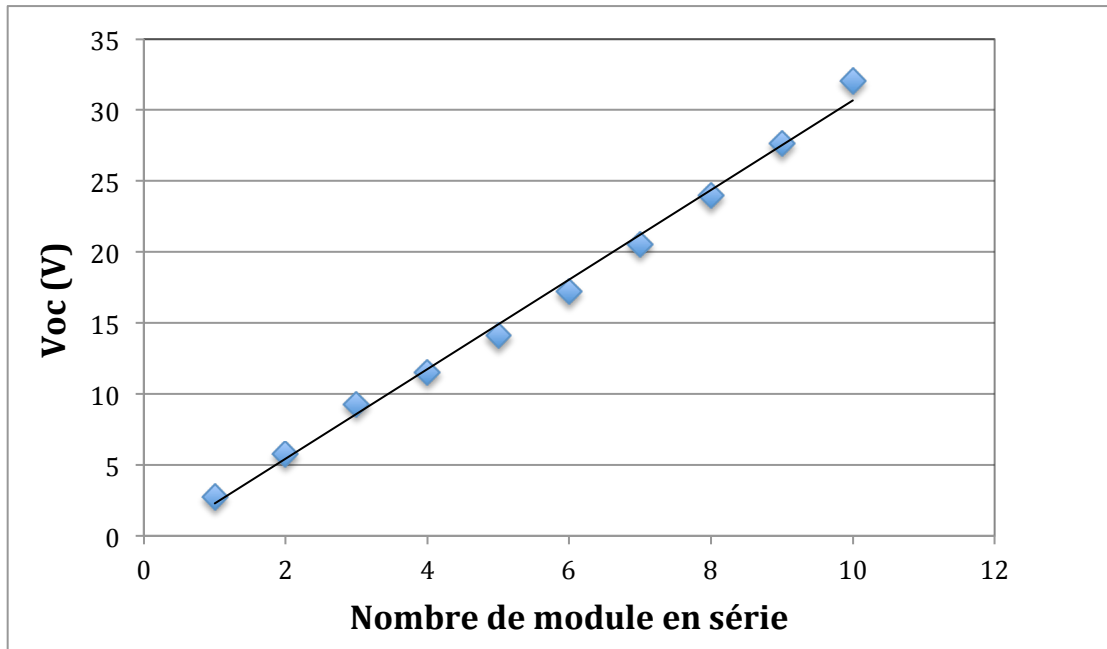


Figure 5-25: Évolution de la tension en circuit ouvert en fonction du nombre de module du «lot 3» connectés en série pour $T_C=38^{\circ}\text{C}$ et $T_H=138^{\circ}\text{C}$

La figure 5-25 indique que la tension en circuit ouvert V_{OC} est linéairement proportionnelle au nombre de modules. Toutefois, il existe quelques points qui s'éloignent de la courbe de tendance, ce qui s'explique par la différence dans la réponse TE des modules et par la variation de la température le long d'un bloc comme il a été expliqué à la sous-section 5.2.2.

La valeur de la tension en circuit ouvert passe de 2.74 V pour un seul module à 32.06 V pour un assemblage de dix modules. Le même comportement a été observé pour la puissance maximale, ce qui révèle que plus le nombre de modules en série augmente, plus la puissance électrique générée est élevée. On note $P_{MAX}= 0.5 \text{ W}$ pour un seul module et $P_{MAX}= 7.15 \text{ W}$ pour un assemblage de dix modules en série, à une différence de température $T_C=38^{\circ}\text{C}$ et $T_H=138^{\circ}\text{C}$ et à une pression de serrage de 1.76 MPa.

On s'attendrait normalement à avoir un facteur de 10 entre les mesures de V_{OC} pour un assemblage de dix modules et celles d'un seul module. Or, ce n'est pas le cas (on trouve une valeur 17% plus large), ce qui s'explique par la variabilité dans les mesures individuelles de V_{OC} pour chaque module (on constate une différence de 16% entre les valeurs de V_{OC} d'après le tableau 5-10). La tension en circuit ouvert est affectée par la non-uniformité de la température, qui représente une limitation pour ce système de mesure.

En effet, nous avons mesuré chaque module (parmi les dix MTE) individuellement sans changer sa position dans le système d'assemblage des MTE et pour une même différence de température $T_C=38^\circ\text{C}$ et $T_H=138^\circ\text{C}$, ce qui a donné le tableau 5-10.

Tableau 5-10: Mesures individuelles de V_{OC} pour les modules du «lot 3»

Module	$V_{OC}(\text{V})$	$I_{CC}(\text{A})$
MTE-1.5-1A	2.74	0.93
MTE-1.5-2A	3.01	0.95
MTE-1.5-3A	3.6	1.15
MTE-1.5-4A	2.3	0.43
MTE-1.5-5A	2.63	0.8
MTE-1.5-6A	3.08	0.94
MTE-1.5-7A	3.41	1.12
MTE-1.5-8A	3.44	1.1
MTE-1.5-9A	3.67	1.22
MTE-1.5-10A	3.96	1.31

Nous remarquons d'après le tableau 5-10 que la variabilité entre les modules du «lot 3» est très grande. Pour V_{OC} , on note une moyenne de 3.18 ± 0.52 V et pour I_{CC} , on note une moyenne de 1 ± 0.25 A.

Par la suite, nous avons comparé les mesures expérimentales faites sur les assemblages des MTE en série avec les mesures de prédiction qui sont obtenues en additionnant les performances individuelles de chaque module.

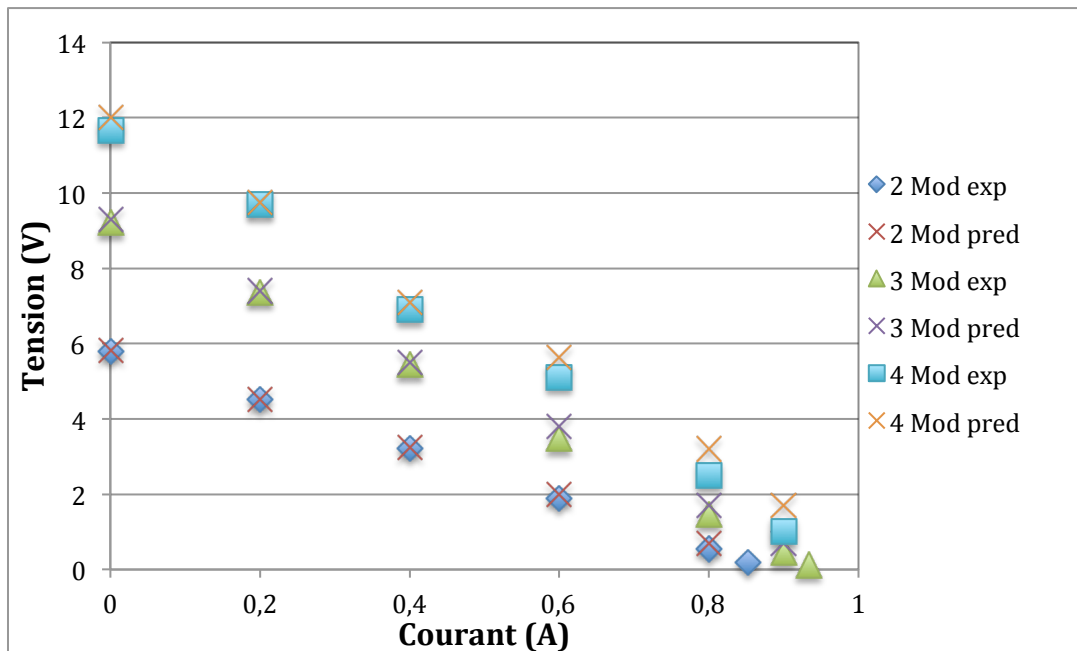


Figure 5-26: Comparaison des caractéristiques I-V entre les mesures expérimentales et les prédictions pour un assemblage de deux, trois et quatre MTE du «lot 3» en série

La figure 5-26 représente la comparaison entre les mesures expérimentales et celles prédites pour un assemblage de deux, trois et quatre modules en série. Nous nous sommes limités à un assemblage maximum de quatre modules en série sur ce graphe par souci de clarté.

D'après cette figure, il est clair que les données expérimentales s'éloignent des données prédites quand le courant augmente (écart de l'ordre de 10%). Les valeurs expérimentales sont inférieures à celles prédites. Cette observation se manifeste plus clairement pour un nombre de modules en série n plus élevé ($n=3$ et 4). En effet, la différence apparaît à courant élevé puisque quand la résistance de charge diminue, le courant électrique devient plus élevé et l'effet Peltier devient plus influant, ce qui entraîne la diminution du flux de chaleur traversant les modules, et par conséquent la diminution de V_{OC} et de la puissance. La variabilité de la température dans le bloc affecte aussi les résultats obtenus.

La performance des modules TE en série ne peut pas être simplement prédite par l'addition des performances individuelles de chaque MTE surtout quand le courant électrique est élevé, car il est difficile de satisfaire les mêmes conditions de mesure avec le système d'assemblage des MTE.

5.2.5 Performance de l'assemblage des modules TE en parallèle

Nous venons de discuter les résultats de l'assemblage en série de plusieurs modules TE dans la sous-section précédente. Maintenant, il serait intéressant d'étudier un assemblage des MTE en parallèle électriquement.

La figure 5-27 représente un circuit équivalent de deux modules branchés électriquement en parallèle, où V_{OC1} et V_{OC2} représentent respectivement, la tension en circuit ouvert du module 1 et du module 2. Idéalement, V_{OC1} et V_{OC2} doivent être égaux ainsi que R_1 et R_2 (résistance électrique interne du module 1 et du module 2) car les deux modules appartiennent au même lot, mais cette condition n'est pas toujours vérifiée en raison de la non-uniformité des modules, comme discutée précédemment.

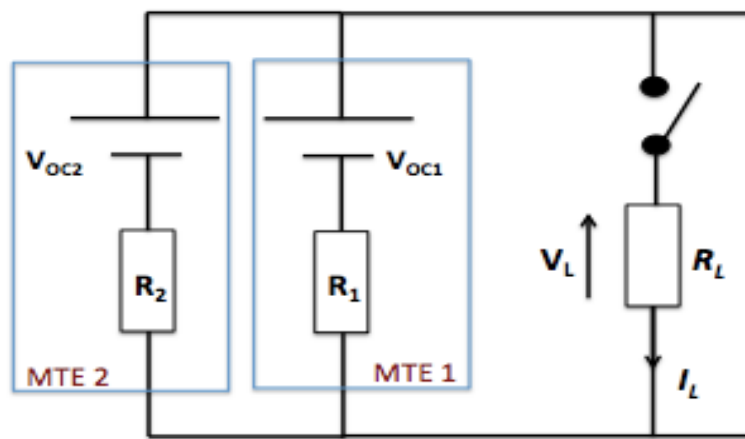


Figure 5-27: Circuit équivalent de deux modules branchés en parallèles pour mesurer la tension en circuit ouvert

Nous avons mené une brève étude sur l'assemblage en parallèle de deux, trois et quatre modules du «lot 3» pour une différence de température $T_C=38^\circ\text{C}$ et $T_H=138^\circ\text{C}$ (figure 5-28). Les modules sont placés de la position 3 à la position 6 dans le système d'assemblage.

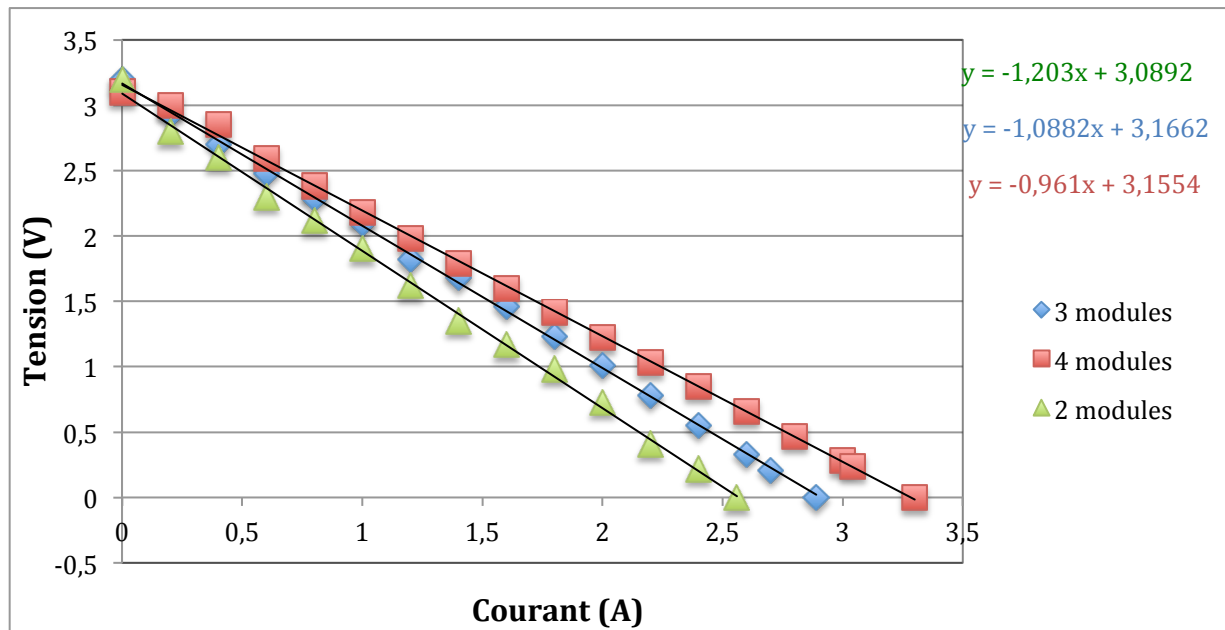


Figure 5-28: Caractéristiques I-V pour des assemblages de MTE du «lot 3» en parallèle ($n=2$, 3 et 4) à $T_C=38^\circ\text{C}$ et $T_H=138^\circ\text{C}$

Nous remarquons que les droites de la figure 5-28 relatives aux trois assemblages de MTE en parallèle se joignent, approximativement, en un point caractéristique qui est V_{OC} .

En effet, dans le cas d'un assemblage en parallèle (figure 5-27), toutes les branches composant le circuit électrique sont soumises à la même tension, cependant, le courant n'est pas le même. Dans un montage à deux résistances :

$$\frac{1}{R_{Totale}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (\text{équation 5.10})$$

La résistance électrique totale est inférieure aux résistances individuelles composant le circuit. Donc, plus on ajoute des modules au circuit, plus la résistance diminue et plus le courant augmente.

D'autre part, on assiste à un léger écart dans les valeurs de V_{OC} (supposés être identiques théoriquement) : $V_{OC}= 3.08 \text{ V}$ pour $n=2$, $V_{OC}=3.16 \text{ V}$ pour $n=3$, et $V_{OC}=3.15 \text{ V}$ pour $n=4$. Cet écart dans les valeurs de V_{OC} est dû à la différence de la réponse TE des modules appartenant à un seul lot. Ceci est confirmé par les résultats du tableau 5-10 où nous avons quantifié chaque module individuellement.

En conclusion, il est clair que les répercussions de la variation de la température sont visibles sur les performances d'un assemblage en série ou en parallèle des modules TE. Ces assemblages sont affectés d'une part par la dissemblance entre les modules appartenant à un même lot (ce qui constitue une limitation du fabricant) et d'autre part, les mesures sont affectées par la variation de la température et sa non-uniformité dans les blocs (ce qui constitue une faille dans le système de mesure). Toutefois, les limitations causées par la variabilité de la température le long du bloc sont les plus grandes, nous avons déjà démontré qu'un écart de 4% de la température entre deux positions du bloc a engendré un écart de 2% à la valeur de V_{OC} pour le même module.

5.3 Comparaison entre les deux systèmes de mesure étudiés

Étant donné que le système d'assemblage des MTE permet la caractérisation d'un seul module si on le souhaite, nous avons décidé de mesurer le même module TE dans les deux systèmes de mesures présentés dans ce projet, en ayant imposé les mêmes conditions thermiques et la même pression de serrage pour les deux essais.

Ces deux mesures ont été réalisées sur le module MTE-1.5-1 pour une différence de température $T_C = 50^\circ\text{C}$, $T_H = 150^\circ\text{C}$ et en ayant appliqué une pression mécanique de 1.2 MPa. Le module a été placé à la position 5 pour être le plus proche possible du thermocouple de contrôle qui est le thermocouple 3 (figure 5-20) afin de satisfaire le plus possible aux conditions thermiques imposées. Le tableau 5-11 regroupe les valeurs de V_{OC} et I_{CC} obtenues pour le module MTE-1.5-1 dans les deux systèmes de mesure. Les incertitudes dans ce tableau sont une estimation de la reproductibilité des mesures.

Tableau 5-11: Comparaison des valeurs de V_{OC} et I_{CC} du module MTE-1.5-1 obtenues pour les deux systèmes de mesure

	V_{OC} (V)	I_{CC} (A)
Système de mesure d'un MTE	4.27 ± 0.009	1.35 ± 0.002
Système d'assemblage des MTE	4.07 ± 0.012	1.24 ± 0.09

La différence dans les valeurs de V_{OC} et I_{CC} est, respectivement, 3.44% et 8.06%. Nous remarquons que le système d'assemblage des MTE sous-estime les valeurs de ces paramètres. Ce système de mesure présente une distribution de température non uniforme le long des blocs, et comme nous avons vu précédemment, cette non-uniformité peut affecter les résultats des mesures.

La caractérisation de ce module dans les deux systèmes de mesures nous a amené à calculer sa résistance interne R et comparer les valeurs trouvées par les deux systèmes. Il a été démontré que la puissance maximale à partir d'une source (module TE) possédant une résistance interne finie R est générée lorsque la résistance de la charge R_L est équivalente à la résistance interne de la source. En d'autres termes, la puissance maximale est produite lorsque $R_L = R$ [25].

Pour trouver la valeur de R , il faut déterminer la valeur de la puissance maximale obtenue à partir de la courbe courant-puissance. À cette valeur de P_{MAX} correspond une valeur du courant I_{Pmax} . À partir de la caractéristique I-V, on peut relever la valeur de la tension correspondante à I_{Pmax} , puis via la relation $U = R_L I$, on peut calculer la valeur de R_L qui sera équivalente à R .

Nous avons appliqué ces calculs pour le module MTE-1.5-1 qui a été caractérisé par les deux systèmes de mesure (figures 5-29 et 5-30) dans les mêmes conditions.

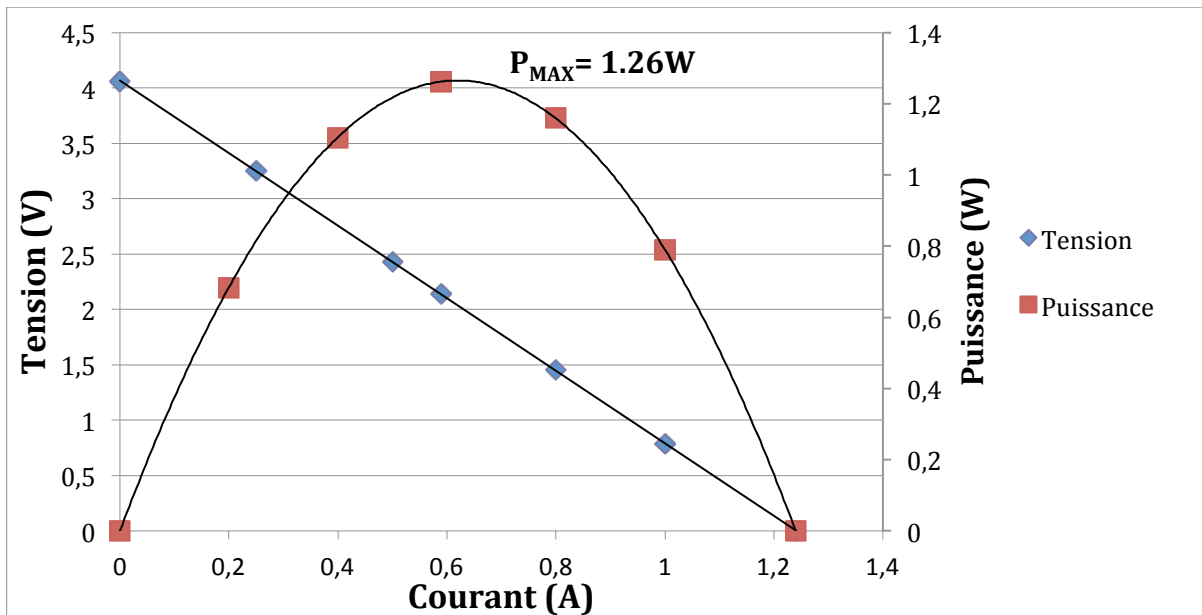


Figure 5-29: Caractéristiques I-V (en bleu) et courant-puissance (en rouge) pour le module MTE-1.5-1, obtenues à $T_C = 50^\circ\text{C}$ et $T_H = 150^\circ\text{C}$ dans le système d'assemblage des MTE

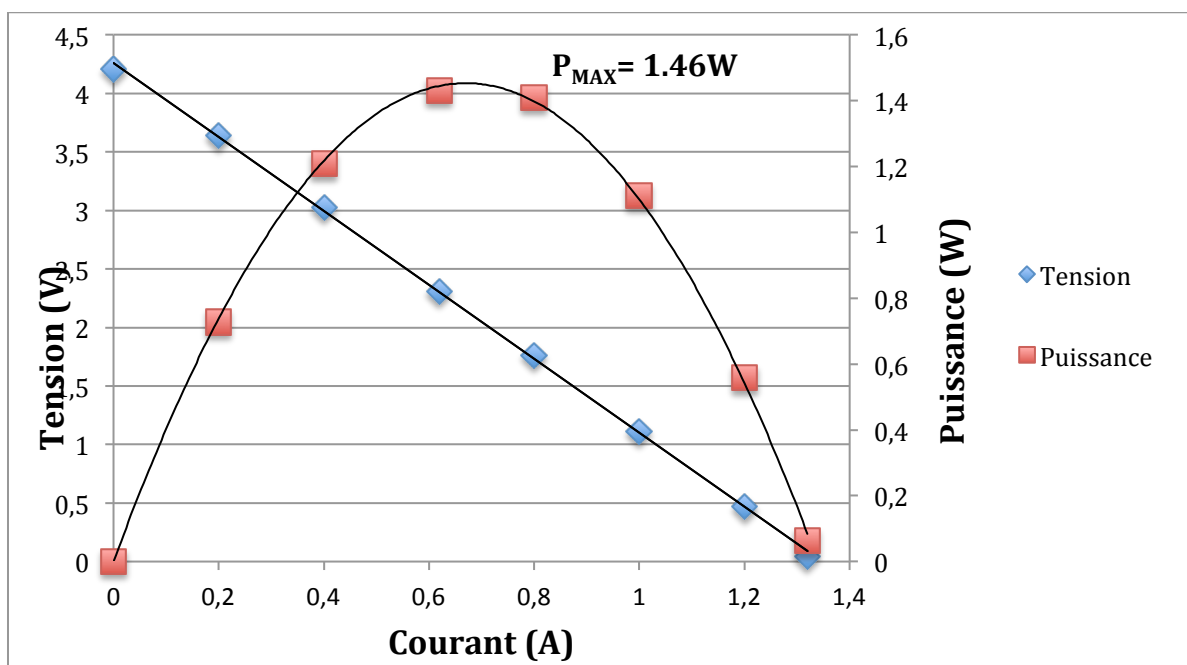


Figure 5-30: Caractéristiques I-V (en bleu) et courant-puissance (en rouge) pour le module MTE-1.5-1, obtenues à $T_C = 50^\circ\text{C}$ et $T_H = 150^\circ\text{C}$ dans le système de mesure d'un MTE

La valeur de la puissance maximale déterminée dans chaque cas apparaît sur les figures 5-29 et 5-30. À l'aide des équations des deux droites, nous avons pu calculer la valeur de la résistance électrique interne du module dans les deux systèmes, nous trouvons $R = 3.17 \, \Omega$ dans le système de mesure des MTE et $R = 3.62 \, \Omega$ dans le système d'assemblage pour le module MTE-1.5-1. La différence entre les deux valeurs est de 14%.

Cette différence ne s'expliquera pas par la qualité et la précision des instruments de mesure étant donné qu'ils sont les mêmes utilisés pour les deux systèmes (régulateur électronique de charge B&K *precision*, thermocouples de type E, régulateur de température PID), mais plutôt par la difficulté d'imposer des conditions identiques dans les deux systèmes. En effet, nous avons vu que la température n'est pas uniforme le long des blocs du système d'assemblage, ce qui peut surestimer ou sous-estimer le flux de chaleur traversant les modules, ceci engendre des conséquences sur les paramètres TE à quantifier. De plus, la manière de déterminer la pression appliquée sur les modules reste une simple méthode de calcul qui ne pourra jamais atteindre

l'exactitude de la pression évaluée par la cellule de charge comme c'est le cas pour le système de mesure des MTE. Ces raisons font que la valeur de R évaluée par le système de mesure des MTE est la plus exacte.

5.3.1 Limites du système d'assemblage des MTE

Nous considérons que la caractérisation d'un module TE peut se faire, pratiquement, dans l'un ou l'autre des deux systèmes de mesure. Toutefois, il est plus approprié de caractériser le module dans le système de mesure des MTE, tout d'abord pour une question de rapidité puisque l'atteinte de l'état stationnaire ainsi que la durée des étapes de mesure sont plus courtes dans ce système. Mais ce qui est plus important, c'est qu'on est arrivé à établir le contrôle de ce système (contrôle des températures des blocs, contrôle et quantification du flux de chaleur, contrôle précis de la pression appliquée sur le module). Contrairement au système d'assemblage des MTE qui présente certaines limitations comme le fait de ne pas pouvoir quantifier le flux de chaleur et l'absence du contrôle de la pression instantanément. Ce système présente, en effet, certaines erreurs de conceptions qu'il est important de ressortir dans ce travail et proposer des améliorations.

Ainsi, il serait plus judicieux d'équiper ce système par des cellules de charge qui seront placées au dessous du système le long du bloc froid afin de pouvoir contrôler la pression en temps réel avec la plus grande précision possible, étant donné l'importance de l'effet de la pression appliquée sur la performance des modules. Par ailleurs, pour éviter la non-uniformité de la température le long du bloc, nous proposons d'augmenter le nombre de cartouches chauffantes. Ce système est muni de six cartouches dans chaque bloc, entre deux cartouches successives on trouve un trou pour recevoir les thermocouples. Il faudra diminuer la distance entre deux cartouches en rajoutant d'avantage afin de pouvoir maintenir une température stable et homogène le long d'un bloc. Finalement, il serait intéressant de placer des compteurs de chaleurs «*heat meter*» au bloc froid, capable d'évaluer le flux de chaleur qui a traversé les modules.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce projet faisait l'objet d'une caractérisation des modules thermoélectriques par le biais de deux systèmes de mesure conçus au laboratoire de thermoélectricité de l'École Polytechnique de Montréal.

L'étude bibliographique nous a permis d'introduire les systèmes de mesure présents aujourd'hui dans les laboratoires de recherche, et de citer leurs avantages et leurs inconvénients.

Ce travail visait à établir le contrôle du système de conditionnement et de mesure d'un seul MTE à la fois qui nous a permis de caractériser un module TE en mesurant les valeurs de V_{OC} , I_{CC} , et P_{MAX} à partir des caractéristiques courant-tension et courant-puissance. Les incertitudes de mesures calculées se situent dans l'intervalle de précision des instruments de mesure. Il a été aussi possible de quantifier le flux de chaleur Q_H en utilisant les thermocouples et d'en déduire la valeur de l'efficacité de conversion η . Toutefois, les mesures du flux de chaleur peuvent présenter une incertitude qui peut atteindre 2.8% pour une différence de température de 100°C.

Il a été démontré que la pression mécanique a une influence sur les modules. La puissance maximale générée par le module augmente avec l'augmentation de la pression appliquée jusqu'à arriver à saturation, ceci est dû à l'augmentation de la conductance thermique de contact entre les surfaces du module avec les blocs. La pression optimale à appliquer dans le cas de ce système de mesure est de 1.2 MPa.

Par ailleurs, une étude des performances des modules appartenant au «lot 1» (modules à pattes courtes, 1.5 mm) et des modules appartenant au «lot 2» (modules à pattes longues, 2 mm) a été faite. Cette étude a révélé que la valeur de I_{CC} est plus élevée dans le cas des modules à pattes courtes en raison de la résistance électrique du module qui est moins élevée pour cette catégorie de module. Une augmentation de 30% dans la longueur des pattes a engendré une baisse de 29% dans la valeur du courant.

En outre, nous avons introduit la notion de la différence de température à travers les thermocouples ΔT_0 , et il a été prouvé que la résistance thermique de la céramique engendre une diminution de 2.56% de la différence de température imposée aux surfaces du module ($\Delta T_0 = 97.44^\circ\text{C}$), pour le cas des modules du «lot 1» et une baisse de 1.8% ($\Delta T_0 = 98.2^\circ\text{C}$) pour le

cas des modules du «lot 2», à $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$.

La tension en circuit ouvert est proportionnelle à la différence de température à travers les thermocouples ΔT_0 comme nous l'avons démontré théoriquement. On note une augmentation de 3.46% à la valeur de V_{OC} pour une augmentation de 33% de la longueur des pattes (augmentation de 0.78% de ΔT_0) à $T_C=50^\circ\text{C}$ et $T_H=150^\circ\text{C}$.

En outre, il s'est avéré que les modules appartenant à un même lot ne présentent pas la même performance thermoélectrique. Des variations d'au moins 1% ont été observées. Cette dissemblance est engendrée par les incertitudes de fabrication, notamment par la différence de la résistance des contacts métalliques ajoutés lors de la fabrication des MTE qui diffère d'un module à l'autre.

Malheureusement, la comparaison de nos résultats expérimentaux avec la fiche technique du fabricant n'a pas abouti étant donné le manque d'informations précises fournies par la compagnie. Toutefois, une simulation a été faite avec le logiciel «*Ansys Workbench*» qui a montré que les résultats expérimentaux étaient compatibles avec les résultats théoriques. Cette simulation a montré que le système de mesure surévalue légèrement le flux de chaleur de 7%, cet écart est supérieur à la précision des mesures du flux de chaleur (2.8%). Puis, des tests ont été menés en protégeant les bords du module, et qui ont montré que les pertes sur les bords du module sont minimales et n'affectent pas énormément les résultats obtenus.

D'autre part, une deuxième partie du projet était consacrée à la caractérisation des modules dans le système d'assemblage des MTE. Tout d'abord, il était important d'étudier l'influence de la position du module dans le système sur la performance du MTE. Ceci a révélé qu'il existe une non-uniformité de la température le long des blocs de ce système de mesure, qui entraîne une dissemblance du flux de chaleur qui traverse les modules sur un même étage : un écart de 4% sur la différence de température entre deux positions du bloc explique l'écart de 1.9% dans la valeur de V_{OC} pour le même module mesuré dans les deux positions.

Une méthode pour le contrôle de la pression de serrage pour ce système a été établie, et il a été démontré que la puissance générée augmente au fur et à mesure que la pression augmente. La puissance maximale a augmenté de 0.46W pour une pression qui a augmenté de 0.88 MPa pour le module MTE-1.5-1A.

L'étude d'un assemblage de $n=1$ jusqu'à $n=5$ modules en série électriquement a montré que tous les assemblages possèdent, approximativement la même valeur de I_{CC} ($1.2 \pm 0.015A$). Les faibles écarts trouvés soulèvent la question de la variabilité entre les modules ainsi que les incertitudes des mesures du courant par le régulateur électronique de charge.

En outre, la valeur de la tension en circuit ouvert passe de 2.74 V pour un seul module à 32.06 V pour un assemblage de dix modules en série. Une comparaison entre les caractéristiques I-V expérimentales des assemblages en série avec des courbes I-V produites à partir des valeurs prédites (addition des performances individuelles de chaque module mesuré séparément) a révélé des écarts de l'ordre de 10% entre les courbes surtout quand le courant augmente. Ceci remonte à la variabilité des modules, d'une part, et d'autre part, à la variation de la température le long d'un bloc.

L'étude de l'assemblage des MTE en parallèle a montré que les caractéristiques I-V se joignent, approximativement, au point V_{OC} . Il a été confirmé que les répercussions de la variation de la température ont des conséquences visibles sur les performances d'un assemblage en série ou en parallèle des modules TE. Ces assemblages sont affectés d'une part de la dissemblance entre les modules appartenant à un même lot (ce qui constitue une limitation du fabricant) et d'autre part, les mesures sont affectées par la variation de la température et sa non-uniformité dans les blocs (ce qui constitue une faille dans le système de mesure, d'où le besoin de réviser la conception actuelle de ce système de mesure).

Une comparaison des performances du module MTE-1.5-1 dans les deux systèmes de mesure a permis d'évaluer sa résistance électrique R par deux moyens. Une différence de l'ordre de 14% a été trouvée entre les deux valeurs. C'est la difficulté d'imposer des conditions identiques dans les deux systèmes qui a engendré cet écart. La valeur de R évaluée par le système de mesure d'un MTE est la plus sûre.

Il est donc recommandé de caractériser le module dans le système de mesure d'un MTE, s'il s'agit d'un seul module à étudier. Ce système s'est montré efficace, capable de caractériser un MTE avec une reproductibilité de 0.3%. Cependant, le système d'assemblage, malgré son originalité, présente quelques limitations qui méritent d'être améliorées. Parmi ces limites, on cite la non-uniformité de la température le long des blocs, qui affecte les résultats obtenus. Pour cela, on propose d'augmenter le nombre de cartouches chauffantes afin de stabiliser la température

voulue dans tout le bloc. L'autre limite qui pourrait affecter les résultats serait le manque de précision dans la détermination de la pression de serrage, qui présente une grande importance dans la caractérisation des MTE. Il serait plus judicieux de placer des cellules de charge sous le bloc froid inférieur afin de pouvoir quantifier la pression instantanément, il est important aussi d'ajouter de la pâte thermique aux surfaces des modules à caractériser pour augmenter la conductance thermique de contact. Enfin, on évoque le problème de la quantification du flux de chaleur traversant le module, qui ne peut pas être évalué dans ce système. Nous proposons d'équiper le système par un compteur de chaleur qu'on placera dans le bloc froid. Il aura pour but de quantifier le flux de chaleur qui a traversé les modules.

Cette étude a permis de ressortir les points forts et les points faibles des systèmes de mesure utilisés pour la caractérisation des modules thermoélectriques. Ceci a permis de connaître les performances de ces dispositifs mais aussi de proposer des améliorations pour les systèmes de mesure. Les principales optimisations que nous envisageons ont pour but d'améliorer le système d'assemblage des MTE pour une utilisation à grande échelle, notamment dans la production d'électricité ou encore dans la récupération de l'énergie thermique perdue.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Bulusu, D.G. Walker, « Review of electronic transport models for thermoelectric materials », *Superlattices Microstruct.* vol. 44, pp. 1-36, 2008.
- [2] S. Revel, « les conversions d'énergie », Disponible: <http://www.energieplanete.fr/conversion-energie-thermique-electrique-effet-seedeck.html>. [Consulté le 01 aout 2014].
- [3] D. M. Rowe, *CRC Handbook of thermoelectrics*, CRC Press, pp. 7-8, 1995.
- [4] « Inventaire des énergies renouvelables », Disponible: <http://energiein.emonsite.com/pages/p1-et-moi.html>. [Consulté le 01 aout 2014].
- [5] D.M. Rowe, Chap.1 «General principles and theoretical considerations » in *Thermoelectric handbook macro to nano*, CRC Press, Taylor & Francis group, pp. 1-9, 2006.
- [6] J. Goldsmid, Chap.1 in «*Introduction to thermoelectricity*», Springer, pp. 4, 2010.
- [7] L.D. Hicks, M.S. Dresselhaus, « Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor », *Phys. rev B*, vol. 47, no. 24, 1993.
- [8] P. Pichanusakorn, P.R. Bandaru, « The optimal Seebeck coefficient for obtaining the maximum power factor in thermoelectrics », *Appl. Phys. Lett*, vol. 94, pp. 223108, 2009.
- [9] M.K. Keshavarz, D. Vasilevskiy, R.A. Masut, S. Turenne, « p-type bismuth telluride-based composite thermoelectric materials produced by mechanical alloying and hot extrusion », *J. Electron. Mater.*, vol. 42, no. 7, 2013.
- [10] J.P. Fleurial, « Design and discovery of highly efficient thermoelectric materials », *CIMTECH-World ceramics congress and forum on new materials N°9*, Florence, Italie, vol. 24, pp. 733-744, 1999.
- [11] D. Vasilevskiy, M.S. Dawood, J-P. Masse, S. Turenne, R.A. Masut, « Generation of nanosized particles during mechanical alloying and their evolution through the hot extrusion process in Bismuth-Telluride-Based alloys », *J. Electron. Mater.*, vol. 39, no. 9, 2010.
- [12] H. Le-Quoc, « Matériaux thermoélectriques du type $\text{Mg}_2\text{Si-Mg}_2\text{Sn}$ élaborés en couches minces par co-pulvérisation assistée par plasma », thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 2011.

- [13] A. Muto, « Device testing and characterization of thermoelectric nanocomposites », M.Sc, Massachusetts institute of technology, 2008.
- [14] C. André, D. Vasilevskiy, S. Turenne, R.A. Masut, «Increase in the density of states in n-type extruded $(\text{Bi}_{(1-x)}\text{Sb}_x)_2(\text{Te}_{(1-y)}\text{Se}_y)_3$ thermoelectric alloys», *J. Phys. D : Appl. Phys*, p. 235401, 2011.
- [15] D. Yan, « Modeling and application of a thermoelectric generator », M.Sc.A, University of Toronto, Canada, 2011.
- [16] S. Dalola, M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, A. Taroni, « Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors », *IEEE Transactions on instrumental and measurement*, vol. 58, no. 1, pp. 99-107, January 2009.
- [17] A. Muto, D. Kraemer, Q. Hao, Z.F. Ren, G. Chen, «Thermoelectric properties and efficiency measurements under large temperature differences», *Rev. Sci. Instrum*, vol. 80, pp. 093901.1-093901.7, 2009.
- [18] M.W. Oh, J.H. Ahn, J.K. Lee, B.S. Kim, S.D. Park, B.K. Min, Y.S. Choi, H.W. Lee, «Estimation of power generation from thermoelectric devices : Model analysis and performance measurements», *Electron. Mater. Lett*, vol. 6, no. 3, pp. 129-134, 2010.
- [19] D.M. Rowe, G. Min, « Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation », *IEEE Proc-Sci.Meas.Technol*, vol. 143, no. 6, pp. 351-356, November 1996.
- [20] G. Min, D.M. Rowe, « Recent concepts in thermoelectric power generation », in *21st International conference on thermoelectronics*, Long Beach, USA, pp. 365-374, 2002.
- [21] E. Sandoz-Rosado, R.J. Stevens, « Experimental characterization of thermoelectric modules and comparison with theoretical models for power generation », *J. Electron. Mater*, vol. 38, no. 7, pp. 1239-1244, 2009.
- [22] « Biolite », disponible : <http://biolitestove.com/> [Consulté le 10 novembre 2014].
- [23] C. Favarel, «Optimisation de générateurs thermoélectriques pour la production d'électricité», thèse de doctorat, Université de pau et des pays de l'adour, France, 2014.

- [24] D. Vasilevskiy, R.A. Masut, S. Turenne, «Thermoelectric and mechanical properties of novel hot extruded PbTe n-type material», *J. Electron. Mater.*, vol. 41, no. 6, pp. 1057-1061, 2012.
- [25] A.Y. Faraji, A. Akbarzadeh, «Design of a compact, portable test system for thermoelectric power generator modules », *J. Electron. Mater.*, vol. 42, no. 7, pp. 1535-1541, 2013.
- [26] A. Montecucco, J. Buckle, J. Siviter, A.R. Knox, « A new test rig for accurate nonparametric measurement and characterization of thermoelectric generators », *J. Electron. Mater.*, vol. 42, no. 7, pp. 1966-1973, 2013.
- [27] H.S. Han, Y.H. Kim, S.Y. Kim, S. Um, J.M. Hyun, «Performance measurement and analysis of a thermoelectric power generator», *in proceedings of the 12th IEEE intersociety conference on thermal and thermomechanical phenomena in electronic systems (ITherm)*, Las Vegas, USA, 2010.
- [28] H. Takazawa, H. Obara, Y. Okada, K. Kobayashi, T. Onishi, T. Kajikawa, «Efficiency measurement of thermoelectric modules operating in the temperature difference of up to 550K», *in proceedings of the 25th IEEE International conference on thermoelectrics*, Vienna, Austria, pp. 189-192, 2006.
- [29] L.I. Anatychuk, M.V. Havryluk, «Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules», *J. Electron. Mater.*, vol. 40, no. 5, pp. 1292-1297, 2011.
- [30] J. Vazquez, R. Palacios, M.A. Sanz-Bobi, A. Arenas, «Test bench for measuring the electrical properties of commercial thermoelectric modules», *in proceedings of the 22nd IEEE international conference on thermoelectrics*, La Grande Motte, France, pp. 589-593, 2003.
- [31] W.H. Chen, C.Y. Liao, C.I. Hung, W.L. Huang, «Experimental study on thermoelectric modules for power generation at various operating conditions», *Energy*, pp. 874-881, 2012.
- [32] X. Gou, H. Xiao, Y. Suwen, « Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system », *Appl. Energy*, vol. 87, pp. 3131-3136, 2010.
- [33] J.M Simard, D. Vasilevskiy, S. Turenne, « Influence of composition and texture on the thermoelectric and mechanical properties of extruded $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2 (\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y)_3$ Alloys », *in Proceedings of the 22 International Conference on Thermoelectrics*, La Grande-Motte, France,

pp. 13-18, 2003.

[34] J. Zhu, J. Gao, M. Chen, J. Zhang, Q. Du, L.A. Rosendahl, R.O. Suzuki, «Experimental study of a thermoelectric generation system», *J. Electron. Mater.*, vol. 40, no. 5, pp. 744-752, 2011.

[35] « Custom Thermoelectric », disponible : <http://www.customthermoelectric.com/>, [consulté le 06 Novembre 2014].

[36] Rowe. D.M, Min.G, « Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation », *IEE Proc-Sci. Meas. Technol*, vol. 143, no. 6, pp. 351-356, 1996.

[37] Abdelkhalek. S, « Étude des phénomènes de transport et de performance thermoélectrique dans les alliages à base de Bi-Te-Se élaborés par extrusion », mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, 2001.

[38] M. Picard, S. Turenne, D. Vasilevskiy, R.A. Masut, «Numerical simulation of performance and thermomechanical behavior of thermoelectric modules with segmented bismuth-telluride-based legs», *J. Electron. Mater.*, Vol. 42, no. 7, pp. 2343-2349, 2013.

ANNEXE A – LOGICIEL «LOADVUE»

«*LoadVUE*» est un logiciel d'analyse de force qui permet l'affichage et la calibration de la cellule de charge (loadstar sensor) sur l'écran de l'ordinateur. Ce logiciel permet à l'utilisateur de lire les données provenant d'une jusqu'à quatre cellules de charge de type iLoad série. Il affiche la valeur de la force appliquée sur le capteur en lb, en temps réel.

La figure suivante est une capture d'écran de ce logiciel, où CH1, CH2, CH3 et CH4 représentent les quatre cellules de charge. Sur cette figure, le logiciel lit les données provenant de CH1.

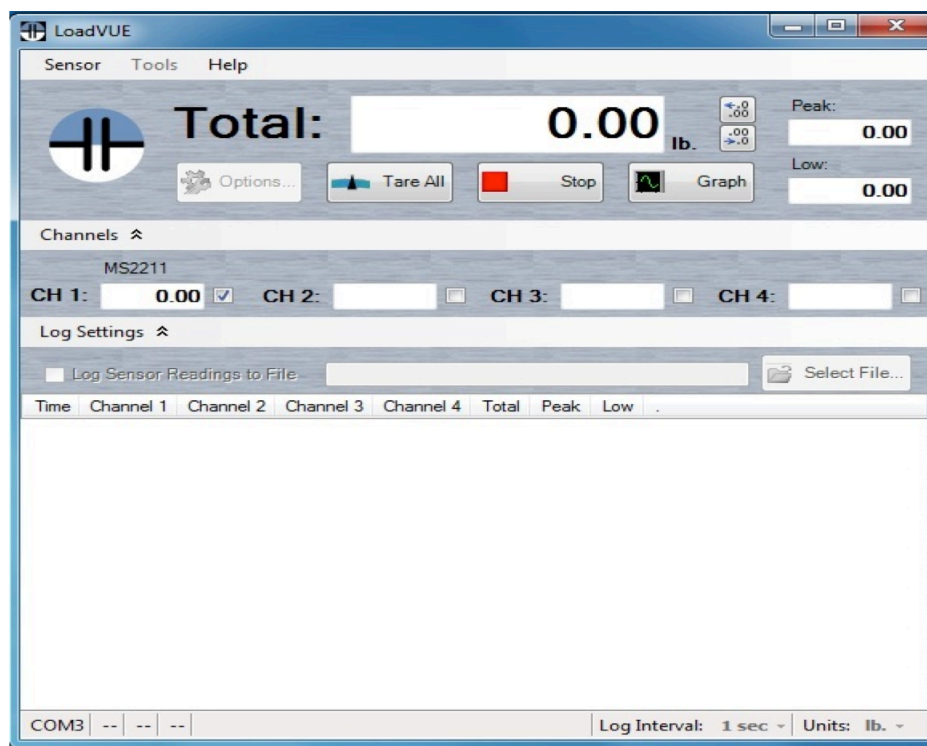


Figure annexe 1 : Capture d'écran du logiciel «*LoadVUE*»

ANNEXE B - LOGICIEL «EFFICACITÉ 2009»

Le logiciel «Efficacité 2009» a été conçu au laboratoire de thermoélectricité de l'ÉPM. Ce logiciel permet la caractérisation des modules thermoélectriques lorsqu'il est couplé aux systèmes de mesure présentés dans ce document. Ce logiciel reçoit les données provenant des thermocouples (températures) et du régulateur électronique de charge (courant –tension).

Avant de lancer un test de mesure, il faut ajouter les différents paramètres et informations demandés par le logiciel sur sa page d'accueil illustrée sur la figure suivante.

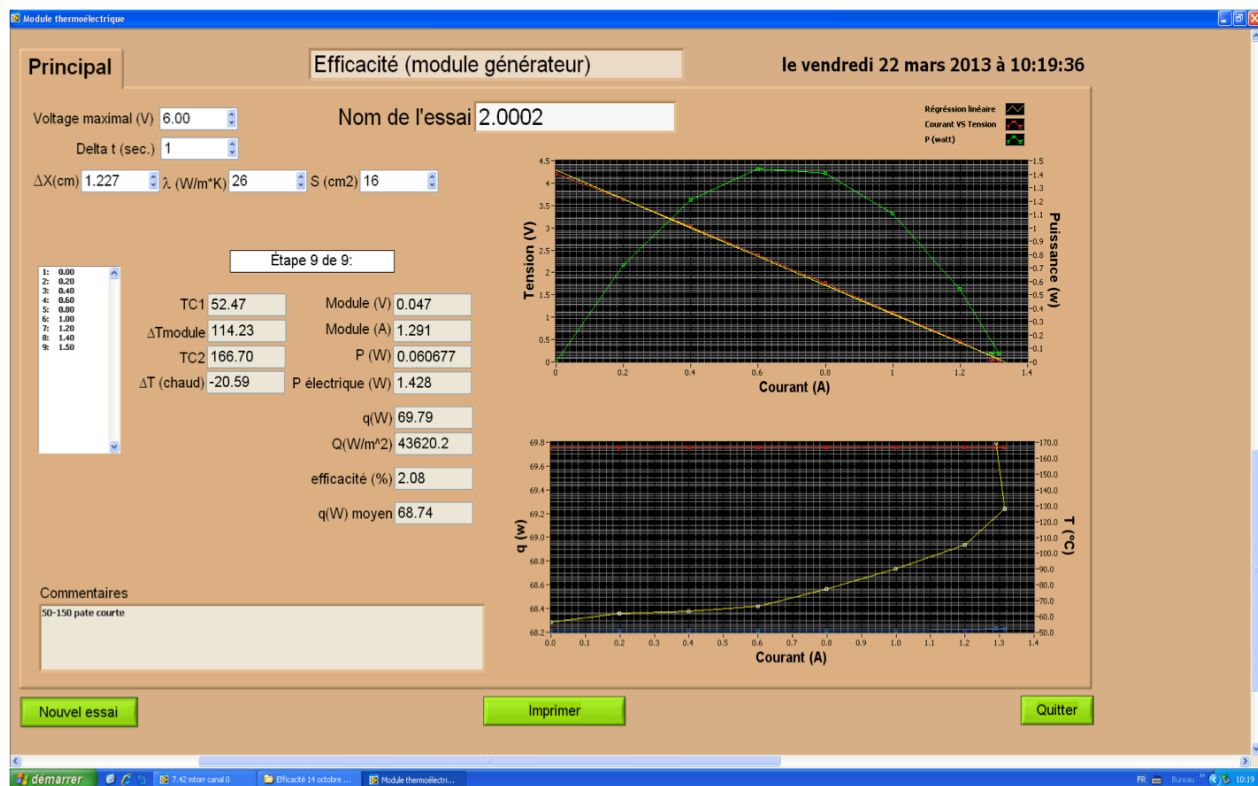


Figure annexe 2 : Logiciel «Efficacité 2009»

Le logiciel propose trois modes de mesures : «efficacité module générateur», «module de refroidissement» et «assemblage de modules». Il faut choisir le mode convenable selon le type des modules à caractériser. Par la suite, il est nécessaire de donner un nom à l'essai effectué pour pouvoir le retrouver plus tard parmi les données enregistrées dans l'ordinateur.

L'utilisateur doit choisir une valeur approximative du voltage maximal que le module étudié peut atteindre, une valeur de Delta t (en sec) que le logiciel met pour changer la valeur du courant, une valeur maximale du courant que le module peut atteindre ainsi que le pas de

variation du courant. Le choix de ces paramètres détermine le nombre des étapes de mesure que mène le logiciel pour caractériser le module en question. Le nombre des étapes de mesure se manifeste par les points sur la courbe courant-tension obtenue. En effet, à chaque fois que le régulateur électronique de charge varie R_L (résistance de charge), le courant change et on note une nouvelle valeur de la tension. Ces valeurs changent au fur et à mesure sur le logiciel, ce qui permet de tracer la caractéristique I-V (voir diagramme de flux). Ce logiciel détermine aussi la puissance en fonction du courant via la relation $P_{MTE}=I \times V$.

Par ailleurs, «Efficacité 2009» reçoit les valeurs des thermocouples T_{H1} et T_{H2} du boîtier USB-TC, ce qui lui permettra de calculer le flux de chaleur via la relation 3.2. Il reçoit aussi les valeurs des thermocouples T_{H3} et T_{CI} , ce qui lui permettra de calculer la différence de température imposée sur le module. Ces valeurs sont mesurées pour chaque variation du courant. Les valeurs du flux de chaleur combinées avec celles de la puissance électrique permettent au logiciel de donner la valeur de l'efficacité de conversion du module étudié via la relation 2.14.

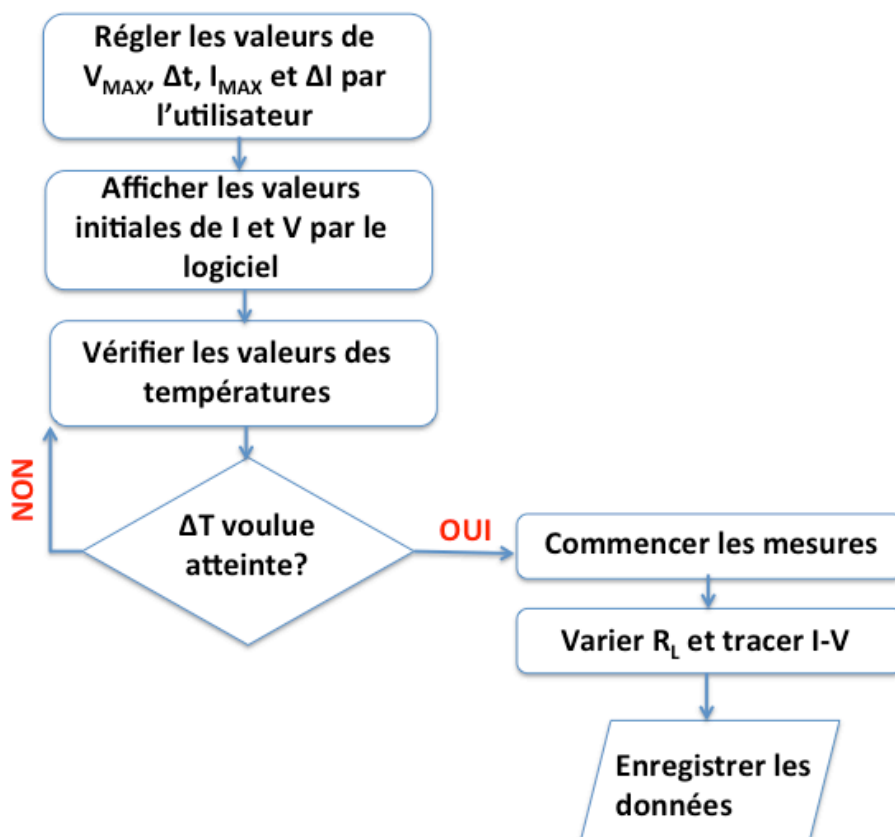


Figure annexe 3 : Diagramme de flux du logiciel «Efficacité 2009»

NB : Comme ce logiciel a été conçu principalement pour le système de mesure d'un seul module, il présente quelques limitations quant à son utilisation avec le système d'assemblage, par exemple, ne pas pouvoir l'utiliser pour caractériser un assemblage de plus que cinq modules TE en série électriquement.

ANNEXE C – PROTOCOLE DE MESURE DANS LE SYSTÈME D'ASSEMBLAGE DES MTE

Cet annexe présente les différentes étapes à suivre pour effectuer un test de mesure avec l'équipement de mesure de l'assemblage de modules TE :

- placer dix modules côte à côte sur chaque étage (entre le bloc chaud et le bloc froid)
- brancher seulement les MTE à caractériser au connecteur de fils
- relier le connecteur de fils au régulateur électronique de charge «B&K *precision* 8500»
- appliquer une force de serrage sur les modules en tournant les rondelles de pression
- fixer les températures voulues des blocs chaud et froid sur le contrôleur de température
- commencer le refroidissement à l'eau
- allumer le système de chauffage
- l'état stationnaire est atteint après environ 30 mn
- sur « Efficacité 2009 », fixer la tension maximale, le courant maximal ainsi que le pas de mesure pour le courant
- lancer le test de mesure
- récupérer les données enregistrées
- éteindre le système de chauffage et refroidir tout le système jusqu'à température ambiante

ANNEXE D – MESURES DES MODULES DU «LOT 1» ET «LOT 2»

Les incertitudes sur les mesures présentées dans les prochains tableaux ont été obtenues en faisant deux tests successifs dans les mêmes conditions de mesure.

Les paramètres Q_{MAX} et η_{MAX} représentent, respectivement, les valeurs maximales du flux de chaleur et de l'efficacité enregistrées lors d'un test.

- Différence de température $T_C=50^\circ\text{C}$, $T_H=150^\circ\text{C}$

Tableau annexe 1 : lot 1

Module	V_{OC} (V)	I_{CC} (A)	P_{MAX} (W)	Q_{MAX} (W)	η_{MAX} (%)	η_{PM} (%)
MTE-1.5-1	4.26±0.21%	1.34±0.18%	1.45±0.4%	68.36±0.85%	2.35±2.1%	2.12±1.25%
MTE-1.5-2	4.21±0.2%	1.31±0.2%	1.44±0.35%	68.80 ±1.1%	2.3±3.3%	2.09±1.45%
MTE-1.5-3	4.32±0.2%	1.34±0.2%	1.5±0.32%	72.35 ±1%	2.4 ±3%	2.07±1.32%

Tableau annexe 2 : lot 2

Module	V_{OC} (V)	I_{CC} (A)	P_{MAX} (W)	Q_{MAX} (W)	η_{MAX} (%)	η_{PM} (%)
MTE-2-1	4.5±0.31%	0.95±0.15%	1.08±1.3%	51.08±1.06%	2.75±2.57%	2.11±2.36%
MTE-2-2	4.41±0.32%	0.93±0.15%	1.06±0.6%	51.23±0.25%	3.2±2.41%	2.06±0.85%
MTE-2-3	4.5±0.31%	0.95±0.22%	1.08±1.31%	49.44±2.7%	2.6±3.07%	2.18±4.01%
MTE-2-4	4.33±0.32%	0.92±0.3%	1.05±0.68%	49.91±0.82%	2.6±3.51%	2.1±1.5%
MTE-2-5	4.48±0.31%	0.96±0.14%	1.03±1.71%	52.21±2%	3.1±3.56%	1.97±3.71%
MTE-2-6	4.42±0.15%	0.94±0.22%	1.04±1.36%	50.17±0.5%	3±2.58%	2.07±1.86%
MTE-2-7	4.4±0.48%	0.93±0.07%	1.01±1.04%	50±1.71%	2.5±3.62%	2.02±2.75%
MTE-2-8	4.53±0.31%	0.95±0.22%	1.03±1.37%	50.08±1.87%	2.57±3.85%	2.05±3.24%
MTE-2-9	4.36±0.47%	0.93±0.37%	1.03±1.16%	50±1.9%	3.01±3.51%	2.06±3.06%
MTE-2-10	4.24±0.33%	0.94±0.22%	1.01±0.62%	50.8±1.09%	2.4±3.44%	1.98±1.71%
MTE-2-11	4.45±0.31%	0.93±0.37%	1.01±0.83%	50.72±0.9%	2.9±2.5%	1.99±1.73%
MTE-2-12	4.43±0.15%	0.93±0.22%	1.05±0.67%	50.45±0.7%	2.7±2.23%	2.08±1.37%
MTE-2-13	4.33±0.32%	0.92±0.3%	1.06±0.73%	50.62±0.63%	2.65±2.66%	2.09±1.36%

- Différence de température : $T_C=20^{\circ}\text{C}$ et $T_H=160^{\circ}\text{C}$

Tableau annexe 3 : lot 1

Module	V_{OC} (V)	I_{CC} (A)	P_{MAX} (W)	Q_{MAX} (W)	η_{MAX} (%)	η_{PM} (%)
MTE-1.5-1	5.95±0.23%	1.84±0.38%	2.77±1.53%	98±1.16%	3.14±2.7%	2.82±2.7%
MTE-1.5-2	5.74±0.3%	1.82±0.38%	2.7±1.05%	99.2±1.71%	3.07±3.45%	2.72±2.76%
MTE-1.5-3	6.03±0.35%	1.92±0.36%	3.04±0.93%	99.7±0.91%	3.25±3.2%	3.04±1.84%

Tableau annexe 4 : lot 2

Module	V_{OC} (V)	I_{CC} (A)	P_{MAX} (W)	Q_{MAX} (W)	η_{MAX} (%)	η_{MAX} (%)
MTE-2-1	6.6±0.21%	1.24±0.56%	2.5±0.56%	76±0.9%	3.41±3.5%	3.28±1.46%
MTE-2-2	6.37±0.66%	1.4±0.76%	2.26±0.62%	70±0.54%	3.43±1.44%	3.22±1.16%
MTE-2-3	6.25±0.11%	1.36±0.51%	2.21±0.95%	71.53±2.42%	3.26±1.73%	3.08±3.37%
MTE-2-4	6.16±0.68%	1.25±0.56%	2.12±1%	70±2.23%	3.31±2.56%	3.02±3.23%
MTE-2-5	6.28±0.56%	1.24±0.56%	2.33±2.11%	73.1±1.35%	3.46±1.63%	3.18±3.46%
MTE-2-6	6.28±0.45%	1.33±0.8%	2.21±0.95%	77.55±1.36%	3.48±2.52%	2.84±2.31%
MTE-2-7	6.11±0.8%	1.32±0.53%	2.11±1.34%	70.04±0.55%	3.25±3.7%	3.01±1.89%
MTE-2-8	6.2±0.45%	1.32±0.53%	2.11±0.67%	76.16±2.15%	2.96±2.86%	2.77±2.82%
MTE-2-9	6.05±0.93%	1.31±0.53%	2.08±0.67%	74.08±1.21%	3.29±3.86%	2.8±1.88%
MTE-2-10	5.84±0.96%	1.3±0.54%	1.96±1.07%	77.72±0.94%	2.71±3.38%	2.52±2.01%
MTE-2-11	6.09±0.92%	1.3±0.55%	2.14±1.98%	71.76±0.62%	3.69±1.53%	3±2.6%
MTE-2-12	6.11±0.34%	1.3±0.54%	2.05±1.03%	74.55±1.26%	2.95±2.4%	2.74±2.3%
MTE-2-13	5.97±0.71%	1.3±0.55%	2±0.7%	74.89±1.68%	2.86±2.96%	2.67±2.38%

ANNEXE E – PROCÉDURE DE CALCUL DE LA PRESSION MÉCANIQUE

Le couple de serrage représente une force appliquée au bout d'un bras de levier, et s'exprime comme suit :

$$\text{Couple (N.m)} = \text{force } F \text{ (N)} \times \text{longueur } D \text{ (m)}$$

Il peut être évalué en utilisant une clé dynamométrique qu'on voit sur la figure annexe 4, où D représente la longueur du bras de levier ($D = 230 \pm 1\text{mm}$ pour la clé dynamométrique que nous avons utilisé dans cette étude), et F représente la force qu'on applique pour tourner la vis, mesurée par la clé dynamométrique.

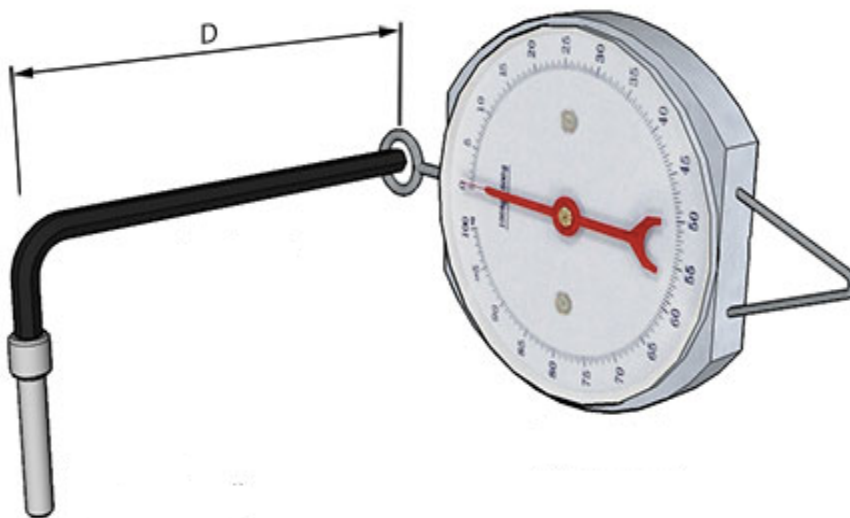


Figure annexe 4 : Clé dynamométrique mesurant la force F

Pour pouvoir connaître la classe de résistance mécanique de la vis, nous avons effectué quatre tests de dureté successifs sur la vis (tableau annexe 5). Puis, nous avons fait la moyenne entre ces quatre mesures, ce qui a donné une dureté de 96.65 ± 5.01 HRB (Dureté Rockwell Bille

d'acier).

La dispersion dans les valeurs de la dureté s'explique par le fait que la dureté n'a pas été mesurée au même endroit sur la vis.

D'après le tableau annexe 6, cette valeur de dureté laisse conclure que la vis appartient à la classe de résistance 6.8 (classe 6.8 : de 89 à 99.5 HRB).

Par la suite, nous avons mesuré le diamètre du filetage de la vis d , le pas du filetage p ainsi que l'ouverture de la tête de la vis s , comme on peut le voir sur la figure annexe 5.

Tableau annexe 5: Tests de dureté effectués sur la vis

Mesure	Dureté (HRB)
Mesure 1	92.7
Mesure 2	100.2
Mesure 3	101.7
Mesure 4	92
Moyenne	96.65±5.01

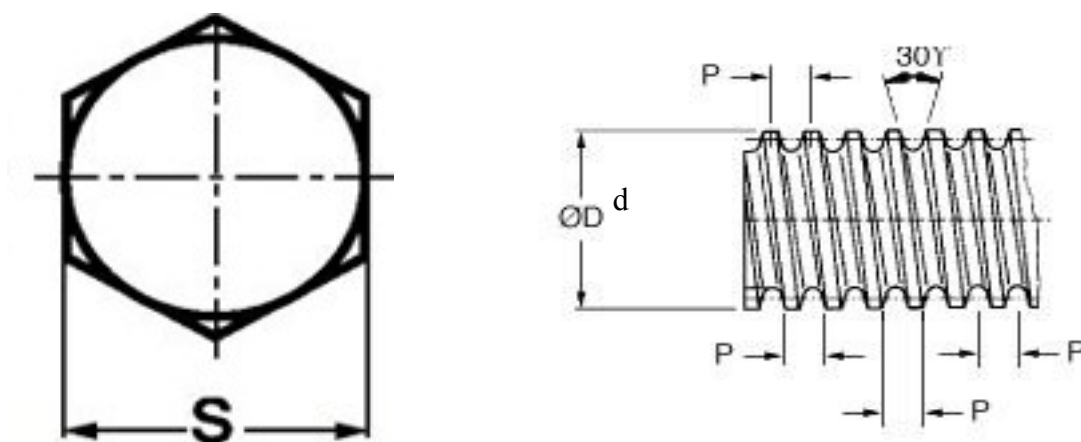


Figure annexe 5: Caractéristiques p , s et d des vis

Dans notre cas, $p = 1.75 \text{ mm}$

$$s = 18 \text{ mm}$$

$$d = 12 \text{ mm}$$

Connaissant les caractéristiques et la classe de résistance de la vis, nous nous sommes référés au tableau annexe 7 où on trouve pour chaque classe de résistance la valeur de Cs et celle de F_0 qui lui correspond. Rappelons que Cs est le produit de la force F appliquée pour tourner la vis par la longueur du bras de levier D , et F_0 correspond à la force de pré-charge appliquée sur les modules.

Nous trouvons pour notre cas : pour $Cs = 69 \text{ N.m}$ alors $F_0 = 23895 \text{ N}$

Nous avons alors calculé Cs pour trois valeurs de la force F , puis nous avons appliqué une règle de trois pour déterminer la valeur de F_0 qui correspond à chacune des valeurs de Cs . Ceci est un exemple de calcul :

$$\text{Pour } Cs = 20.447 \text{ N.m : } F_0 = \frac{23895 \times 20.447}{69} = 7091.27 \text{ N}$$

Pour calculer la pression, il faut prendre en compte qu'il existe deux rondelles de pression dans le système de mesure, donc la pression sera multipliée par 2 :

$$P = \frac{2 \times F_0}{S}$$

Avec P : la pression appliquée sur les MTE (en MPa)

F_0 : la force de pré-charge (en N)

S : surface du bloc ($40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 = 16000 \text{ mm}^2$)

Nous avons fait de même pour les autres valeurs de F .

Tableau annexe 6: Caractéristiques mécaniques des boulons, vis et goujons pour différentes classes de résistance mécanique, reproduit de «documentation technique de boulonnerie, Emile Maurin»









Tableau n°4. Caractéristiques mécaniques des boulons, vis et goujons

Caractéristiques		Classe de qualité											
		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8 ⁽¹⁾		9.8 ⁽²⁾	10.9	12.9	
Résistance à la traction R_m ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ , N/mm ²	nom.	300	400		500		600	d ≤ 16 mm	d > 16 mm	800	1 000	1 200	
	min.	330	400	420	500	520	600	800	830	900	1 040	1 220	
Dureté Vickers HV, F > 98 N	min.	95	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385	
	max.	250						320	335	360	380	435	
Dureté Brinell HB, F = 30 D ²	min.	90	114	124	147	152	181	238	242	276	304	366	
	max.	238						304	318	342	361	414	
Dureté Rockwell HR	min.	HRB	52	67	71	79	82	89	-	-	-	-	-
		HRC	-	-	-	-	-	-	22	23	28	32	39
	max.	HRB	99,5						-	-	-	-	-
		HRC	-						32	34	37	39	44
Dureté superficielle HV 0,3	max.	-						(6)					
Limite inférieure d'écoulement ⁽⁷⁾ R_{eL} , N/mm ²	nom.	180	240	320	300	400	480	-	-	-	-	-	
	min.	190	240	340	300	420	480	-	-	-	-	-	
Limite conventionnelle d'élasticité $R_{p0.2}$, N/mm ²	nom.	-						640	640	720	900	1 080	
	min.	-						640	660	720	940	1 100	
Contrainte à la charge d'épreuve S_p , N/mm ²	S_p , R_{eL} ou S_p , $R_{p0.2}$	0,94	0,94	0,91	0,93	0,90	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,88	
		180	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970	
Allongement pour cent après rupture A	min.	25	22	14	20	10	8	12	12	10	9	8	
Résistance à la traction avec la cale biaisée ⁽⁸⁾		Les valeurs pour vis et boulons entiers (pas les goujons) ne doivent pas être inférieures aux valeurs minimales de résistance à la traction indiquées (page 521).											
Résilience J	min.	-			25	-		30	30	25	20	15	
Solidité de la tête		Aucune rupture											
Hauteur minimale de la zone du filetage non décarburée E		-						$\frac{1}{2} H_1$		$\frac{2}{3} H_1$	$\frac{3}{4} H_1$		
Profondeur maximale de décarburation totale G, mm		-						0,015					

Tableau annexe 7: Valeurs de C_s et F_0 pour chaque classe de résistance en fonction des paramètres d , p et s , reproduit de «documentation technique de boulonnerie, Emile Maurin»

Coefficient de frottement moyen $\mu = 0,20$

MONTAGE A SEC

														
d (mm)	p (mm)	s (mm)	C_s	F_0	C_s	F_0	C_s	F_0	C_s	F_0	C_s	F_0	C_s	F_0
1,6	0,35	3,2	0,086	210	0,120	294	0,137	335	0,183	447	0,206	503	0,269	657
2	0,40	4	0,183	349	0,256	488	0,293	558	0,390	744	0,439	837	0,573	1093
2,5	0,45	5	0,383	582	0,536	815	0,612	931	0,816	1242	0,918	1397	1,20	1824
3	0,50	5,5	0,66	874	0,92	1224	1,06	1399	1,41	1866	1,60	2099	2,07	2740
4	0,70	7	1,51	1514	2,11	2120	2,42	2422	3,22	3230	3,66	3635	4,74	4744
5	0,80	8	3	2481	4,20	3473	4,81	3970	6,4	5293	7,27	5958	9,4	7774
6	1	10	5,2	3498	7,2	4893	8,3	5598	11,1	7464	12,57	8392	16,3	10962
8	1,25	13	12,6	6426	17,7	8997	20	10283	27	13710	30,62	15423	39	20137
10	1,50	16	25	10238	35	14334	40	16382	53	21843	61	24575	78	32082
12	1,75	18	43	14934	60	20908	69	23895	92	31860	105	35849	136	46795
14	2	21	69	20514	97	28719	111	32822	148	43763	167	49142	218	64277
16	2	24	108	28280	152	39592	174	45248	232	60331	262	67944	341	88611
18	2,5	27	149	34324	209	48054	239	54919	330	75421			469	107549
20	2,5	30	213	44188	298	61863	341	70700	471	97253			667	138456
22	2,5	34	293	55298	411	77418	470	88478	648	121574			920	173269
24	3	36	366	63630	513	89083	586	101809	809	140084			1148	199376
27	3	41	544	83910	762	117474	871	134257	1201	184517			1706	262920
30	3,5	46	737	101914	1032	142679	1180	163062	1628	224292			2311	319331
33	3,5	50	1004	127210	1406	178094	1607	203536	2216	279953			3148	398593
36	4	55	1288	149174	1803	208844	2060	238679	2840	328236			4036	467413
39	4	60	1677	179487	2348	251282	2683	287179	3697	394919			5255	562393
42	4,5	65	2070	205323	2898	287452	3312	328516	4554	451710			6486	643344
45	4,5	70	2596	240641	3635	336897	4154	385025	5712	529410			8136	754008
48	5	75	3130	270321	4383	378449	5009	432514	6887	594706			9809	847006
52	5	80	4041	324763	5657	454668	6465	519620	8889	714478			12661	1017590
56	5,5	85	5034	374739	7048	524635	8054	599582	11075	824426			15773	1174182
60	5,5	90	6266	438337	8772	613672	10026	701340	13785	964342			19634	1373457
64	6	95	7533	495676	10546	693947	12052	793082	16572	1090488			23603	1553119

ANNEXE F – RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE D'UN ASSEMBLAGE DE MTE EN SÉRIE

Tableau annexe 8: Valeurs de la résistance électrique interne de l'assemblage des modules en série mesurée par le régulateur électronique de charge «B&K *precision* 8500» et par le voltmètre «Wavetek 15XL»

Assemblage en série	$R_{B\&K} (\Omega)$	$R_{Volt} (\Omega)$	Écart (Ω)
1 module	3.35	3.25	0.1
2 modules	6.72	6.6	0.12
3 modules	9.89	9.81	0.09
4 modules	14.32	14.25	0.06
5 modules	17.56	17.4	0.17
6 modules	21.37	21.32	0.04
7 modules	24.44	24.37	0.07
8 modules	27.83	27.75	0.07
9 modules	31.17	31.09	0.08
10 modules	36.57	36.27	0.3

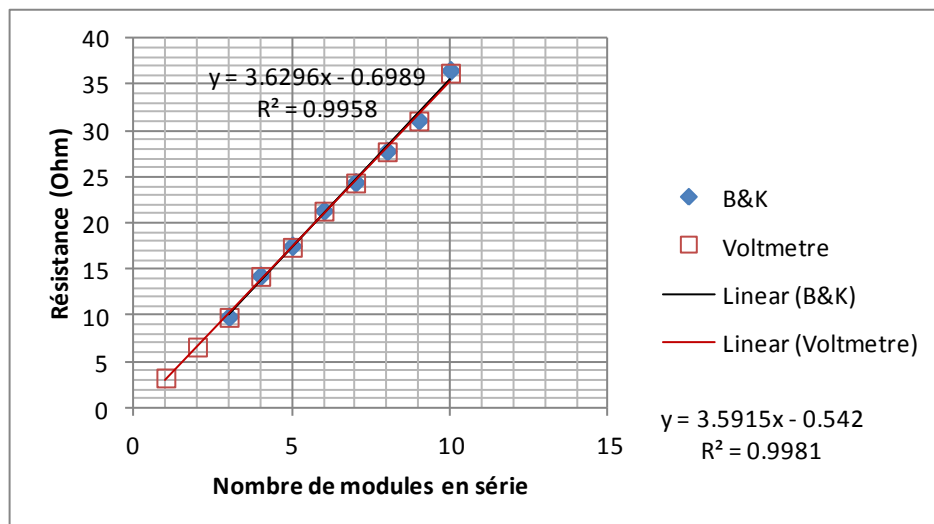


Figure annexe 6 : Résistance électrique en fonction du nombre de modules en série